



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Lepené spoje za zvýšené teploty

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Matyáš Zakouřil

V Praze, leden 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zakouřil** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **459329**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Integrální bezpečnost staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Lepené spoje za zvýšené teploty

Název diplomové práce anglicky:

Adhesive joints at elevated temperature

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D., katedra ocelových a dřevěných konstrukcí FSV

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **17.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: ZAKOUŘIL Matyáš

Název diplomové práce: Lepené spoje za zvýšené teploty

Základní část: K134 podíl: 100 %

Formulace úkolů: Viz zadání

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: - podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Prohlášení

Jméno studenta: Bc. Matyáš Zakouřil

Název diplomové práce: Lepené spoje za zvýšené teploty

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Zdeňka Sokola, Ph.D., za použití literatury a zdrojů uvedených v seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. za vedení předložené diplomové práce, odborné konzultace a cenné rady. Dále patří poděkování Ing. Markétě Zikmundové, doc. Ing. Martině Eliášové, CSc. a Michalu Gschrayi za pomoc při zkouškách a odborné konzultace v rámci oboru lepených konstrukčních spojů.

Abstrakt

Práce zkoumá chování lepených konstrukčních spojů za zvýšených teplot od 60 do 230 °C, se zaměřením na přípoje skleněných a kovových konstrukcí (ocel, hliník). Teoretická část práce shrnuje současné poznatky o skleněných konstrukcích, lepených spojích a lepidlech ve stavebnictví, o jejich vlastnostech za běžných a zvýšených teplot a možnostech aplikací. Výzkumná část práce má za cíl prověřit chování lepených spojů na základě zkoušek těles malých rozměrů. Pro spojení zkušebních těles byla použita lepidla Scott Bader Crestabond® M7-05 a Permabond ES5504 v jednotné tloušťce 1 mm. Zkušební tělesa byla zkoušena ve smyku, za současného působení teplotního namáhání. Výsledky těchto zkoušek byly srovnány s referenční sadou zkoušenou za běžné teploty. Porovnává se pokles smykové pevnosti spoje a způsob jeho porušení. Výsledky jsou doplněny o numerický model zkušebního vzorku a ukázkový příklad z praxe v software Ansys Workbench 2019 R2.

Klíčová slova

Lepený spoj, deformace, únosnost, termická odolnost, namáhání, zvýšená teplota, napětí, tah, smyk, odlupování, epoxidová pryskyřice, fenolová pryskyřice, akrylát, reaktoplasty, modifikovaná lepidla, polyimid, polybenzimidazol, zkoušky, tělesa malých rozměrů, numerický model, Ansys

Abstract

The thesis investigates behaviour of adhesively bonded joints exposed to elevated temperatures, ranging from 60 to 230 °C, with special focus on connections of glass and metal adherends (steel and aluminium). Theoretical part of the thesis summarizes current knowledge about glass structures, adhesive bonding and properties of different adhesives, exposed to both regular and elevated temperatures. Experimental part of the thesis contains a description and results of small scale experiments. Specimens were designed as double lap joints, bonded with adhesives Scott Bader Crestabond® M7-05 and Permabond ES5504, both in a 1 mm thick layer. Specimens were shear and thermally stressed. The results of specimens exposed to elevated temperatures were then compared to results of reference specimens, tested at 20 °C. The goal was to compare the reduction of shear strength and form of failure, typical for the joints. Last part of the thesis contains two numerical models, related to the research, created in Ansys Workbench 2019 R2 software.

Keywords

Adhesive joint, deformation, load bearing capacity, thermal resistance, strain, elevated temperature, stress, tension, shear, peel, epoxy resin, phenolic resin, acrylate, thermosetting resin, modified adhesive, polyimide, polybenzimidazole, experiments, small scale specimens, numerical model, Ansys

Obsah

Obsah.....	4
Seznam použitých symbolů a zkratek	6
Latinské symboly	6
Řecké symboly	6
Zkratky	7
1. Úvod – motivace pro výzkum lepených spojů ve stavebnictví	8
2. Sklo – konstrukční materiál ve stavebnictví	9
2.1. Historický vývoj skla.....	9
2.2. Technologie výroby a úpravy skla.....	10
2.3. Plavené sklo	10
2.3.1. Tepelně zpevněné a tvrzené sklo.....	11
2.3.2. Chemicky zpevněné sklo.....	12
2.3.3. Vrstvené sklo.....	13
2.4. Vlastnosti konstrukčního skla - obecně	14
2.5. Vlastnosti konstrukčního skla – zasklení s požární odolností	15
2.6. Spoje prvků a konstrukcí ze skla	17
2.6.1. Mechanický spoj	17
2.6.2. Lepený spoj – úvod	19
3. Konstrukční lepidla – spojovací materiál ve stavebnictví	21
3.1. Chemická podstata polymerů	21
3.2. Dělení polymerních lepidel	23
3.2.1. Elastomery.....	23
3.2.2. Plasty	24
4. Chování konstrukčních lepidel ve spoji za běžné teploty	25
4.1. Všeobecně.....	25
4.2. Teorie lepení, princip adheze a koheze	26
4.2.1. Adheze.....	26
4.2.2. Koheze.....	27
4.2.3. Smáčivost	27
4.3. Chování lepených spojů v závislosti na tuhosti.....	28
4.3.1. Poddajný spoj – netuhý	28
4.3.2. Nepoddajný spoj – tuhý.....	28

5. Chování konstrukčních lepidel ve spoji za zvýšené teploty	30
5.1. Všeobecně.....	30
5.2. Chemické faktory ovlivňující odolnost proti teplotě.....	30
5.3. Druhy lepidel odolných vůči namáhání teplotou.....	32
5.3.1. Konstrukční silikon	32
5.3.2. Epoxidové pryskyřice.....	32
5.3.3. Modifikované fenolové pryskyřice	33
5.3.4. Polyimidy a aromatické pryskyřice.....	33
5.3.5. Polybenzimidazol	33
5.3.6. Bismaleimid	33
5.3.7. Kyanoakryláty	34
5.4. Závěr rešerše.....	34
6. Výzkumná část práce – cíle a metody k jejich dosažení	36
6.1. Cíle diplomové práce.....	36
6.2. Metody k dosažení cílů.....	36
7. Výzkumná část práce – zkoušky těles malých rozměrů	37
7.1. Zkušební tělesa – technologie výroby, značení a možné porušení vzorků.....	37
7.2. Použitá lepidla	40
7.2.1. Scott Bader Crestabond® M7-05.....	40
7.2.2. Permabond ES5504	40
7.3. Zkušební sestava.....	41
7.4. Zkoušky s lepidlem Crestabond M7-05 při 60 °C a 80 °C – první část	42
7.4.1. Sada referenčních vzorků sklo – hliník za teploty 22°C	46
7.4.2. Sada vzorků sklo – hliník za teploty 80°C	47
7.4.3. Sada referenčních vzorků sklo – ocel za teploty 22°C.....	50
7.4.4. Sada vzorků sklo – ocel za teploty 60°C.....	52
7.4.5. Vyhodnocení první části s lepidlem Crestabond® M7-05.....	53
7.5. Zkoušky s lepidlem Permabond ES5504 při 200°C a 230°C – druhá část.....	55
7.5.1. Sada vzorků sklo – ocel.....	57
7.5.2. Referenční sada vzorků ocel – ocel za teploty 20°C.....	59
7.5.3. Sada vzorků ocel – ocel za teploty 200°C.....	61
7.5.4. Sada vzorků ocel – ocel za teploty 230 °C.....	63
7.5.5. Vyhodnocení druhé části s lepidlem Permabond ES5504	66

8.	Výzkumná část práce – numerické modelování lepených spojů.....	68
8.1.	Použitý software – Ansys Workbench 2019 R2.....	68
8.2.	Model č. 1 – zkušební těleso	68
8.2.1.	Návrh modelu 1	68
8.2.2.	Výsledky modelu 1.....	70
8.3.	Model č. 2 – lepený spoj v návrhové konstrukci.....	74
8.3.1.	Předpoklad použití lepeného spoje ve skutečné konstrukci.....	74
8.3.2.	Návrh modelu 2.....	75
8.3.3.	Výsledky modelu 2.....	77
8.3.4.	Doplnění výsledků numerického modelu 2.....	78
9.	Závěr diplomové práce	80
10.	Literatura	82
11.	Seznam příloh	84
12.	Seznam obrázků	84
13.	Seznam tabulek.....	87

Seznam použitých symbolů a zkratk

Latinské symboly

A	Plocha	m^2
E	Youngův modul pružnosti	MPa
G	Modul pružnosti ve smyku	MPa
F	Síla	N
c	Měrná tepelná kapacita	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$

Řecké symboly

ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
τ	Smykové napětí	MPa
σ	Napětí	MPa
γ	Poměrná smyková deformace	-
λ	Koeficient tepelné vodivosti	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$

Zkratky

PVB	Polyvinyl-butyrál
EVA	Etylen-vinylacetát
TPU	Termoplastický polyuretan
PE	Polyester
BTDA	dianhydrid benzofenon-tetrakarboxylové kyselina – polymerní látka
PMDA	dianhydrid kyseliny pyromelitové – polymerní látka
EPDM	Ethylenpropylénový-dienový kaučuk – syntetická pryž
MS	Microsoft

1. Úvod – motivace pro výzkum lepených spojů ve stavebnictví

Předložená diplomová práce zkoumá chování konstrukčních lepených spojů za zvýšených teplot. V návaznosti na současné poznatky o lepených spojkách ve stavebnictví byly v rámci práce provedeny zkoušky smykové pevnosti na tělesech malých rozměrů. Tělesa byla sestavena tak, aby simulovala nosný lepený spoj v konstrukci. Zkoušky byly zaměřeny na zkoumání lepených spojů za zvýšených teplot (60-230°C) pro dvě vybraná lepidla a různé připojené materiály (sklo, ocel, hliník).

Téma lepených spojů je úzce spjato s aktuální výstavbou, současná architektura klade stále větší důraz na pohledové, ale i nosné prvky provedené z oceli a konstrukčního plochého skla. Sklo je oblíbený materiál především díky svému čistému vzhledu a transparentnosti. Motivací předložené práce je rozšíření znalostí v oblasti lepených spojů skleněných a kovových konstrukcí, především ve vztahu k požární bezpečnosti staveb.



obr. 1.1: Pavilón Expo 1967, Montreal (vlevo) a muzeum Rietberg, Zürich (vpravo) [14]



obr. 1.2: Bourse de Commerce, Paříž (vlevo) a botanická zahrada, Dahlem (vpravo) [14]

2. Sklo – konstrukční materiál ve stavebnictví

Sklo je v dnešní době nepostradatelným materiálem ve stavebnictví, pro jeho vysokou propustnost světla v části viditelného spektra, a snadnou možnost tvarování je oblíbeným architektonickým materiálem pro nejrůznější prvky a konstrukce.

Využití v současnosti nalezneme zejména pro zasklení okenních a dveřních otvorů, pro konstrukce lehkých obvodových plášťů, a také jako materiál použitý v doplňkových konstrukcích (např. zastřešení vstupní haly nebo příčky). Konstrukce vyrobené ze skla nevarují před kolapsem a jejich použití v nosných konstrukcích je nebezpečné, využití tímto způsobem je spíše u menších prvků jako schodiště, lávky nebo přístřešky. Probíhající výzkum však postupně umožňuje použití skla v nosných konstrukcích střech i jako skleněných nosníků. Při navrhování nosných skleněných prvků je nutné uvažovat veškeré možné krátkodobé i dlouhodobé vlivy resp. namáhání, ať už chemické, nebo fyzikální. Optimální návrh konstrukce a spojů je náročnější, než u ostatních materiálů.

Sklo je anorganický a amorfní materiál, vzniklý tavením křemičitého písku a dalších surovin za vysokých teplot a následným ochlazením. Materiál je visko-elastický, za běžné teploty tuhý, ale při teplotách nad přechodovou oblastí (cca 580 °C) je v tekutém stavu. [1][2]

2.1. Historický vývoj skla

Nejstarší nálezy skleněných výrobků sahají až do roku 3500 př. n. l. na území Egypta, kde byly vyrobeny první zbarvené nádoby a šperky. První známky čirého skla jsou ze starověkého Říma, kde bylo použito skleněných tabulí v oknech znakem prestiže a bohatství.

Jednoduchý způsob výroby, lití skla na stůl a jeho roztažení byl následně převzat evropskými národy, a až ve 14. století vzniká první manufaktura na výrobu skleněných tabulí. Toto ploché sklo bylo možné využívat ve stavebních konstrukcích jako výplně otvorů malých rozměrů.

Tzv. metoda koruny spočívala ve vytvoření skleněné bubliny, která byla následně rychle rozvířena tak, aby vznikla tenká a plochá vrstva. Touto metodou bylo možné vytvořit skleněné tabule o velikosti do 0,5 x 0,75 m.

V 19. století, kdy byla vynalezena Siemens-Martinova pec, bylo možné při vyšších teplotách vytvořit sklo větších rozměrů, a rozšířit tak jeho použití ve stavebnictví.

V r. 1900 patentoval rakouský chemik Rudolf. A. Seiden pracovní postup výroby tvrzeného skla, který spočíval v rychlejší ochlazení taveniny, a vytvoření přídavného napětí v materiálu.

V polovině 20. století byl vynalezen způsob výroby plaveného skla (tzv. float glass), který je dnes nejpoužívanějším pro vytvoření plochých skleněných tabulí.

V průběhu vývoje až do současnosti proběhly také různé experimenty s tvrzením skla pomocí různých přísad, nebo laminování skleněných tabulí. Původní celulózové materiály, používané k lepení tabulí k sobě, špatně odolávaly vlhkosti a rychle degradovaly a byly proto nahrazeny ve 30. letech spojovacími prvky z polyvinylbutyralu (PVB). Ve stavebnictví se toto laminované sklo začalo používat až v 70. letech pro opláštění budov. [3][4]

2.2. Technologie výroby a úpravy skla

V současnosti se používají skelná vlákna v různých úpravách v mnoha odvětvích průmyslu, ve stavebnictví je dominantní výroba plochého skla způsobem plavení. Plavené sklo je netvrzené. Tento způsob výroby je celosvětově rozšířen od 60. let 20. století, v ČR se začal využívat o 10 let později.

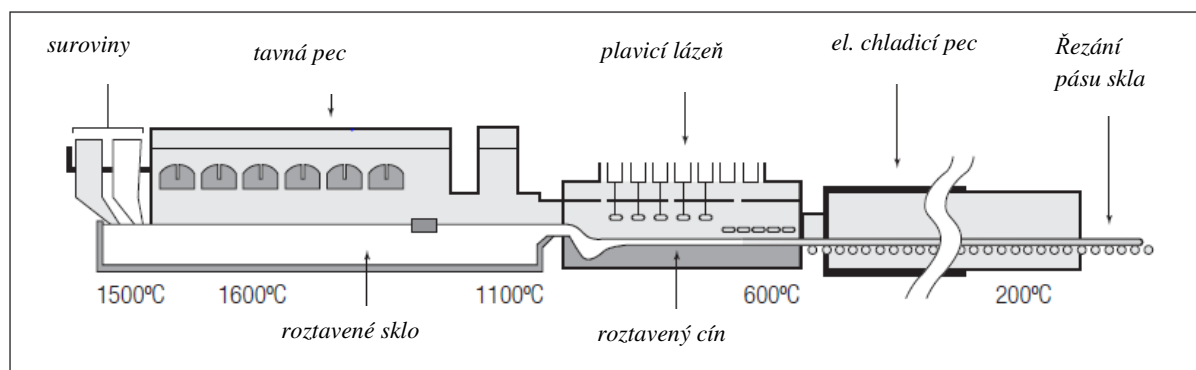
2.3. Plavené sklo

Vstupní materiály tvoří sklářský kmen (tj. křemičitý písek), obsahující sklotvorný SiO_2 , čeriva jako pomocné látky (sírany, dusičnany) a skleněné střepy z recyklovaného odpadu v maximálním množství do 30% z celkového objemu.

Materiál	Vzorec	% Složení
Silica	SiO_2	69-74%
Lime	CaO	5-14%
Soda	Na_2O	10-16%
Magnesia	MgO	0-6%
Alumina	Al_2O_3	0-3%

obr. 2.1: Typická chemická skladba vápno-křemičitého skla [3]

Upravené a vysušené jsou tyto materiály smíšený a homogenizovány v mísícím zařízení, následně se taví v pecích při teplotách okolo 1500°C . Tavenina se následně roztéká v komoře s roztaveným címem a v důsledku působení povrchového napětí a gravitace získává hladký horní povrch a rovnoměrnou tloušťku. Na konci komory probíhá kontrolované ochlazování taveniny z cca 600°C až na 200°C , přitom se odstraní nevhodně rozložené pnutí v materiálu. Vhodným procesem ochlazení se také zvyšuje pevnost skla (viz dále).

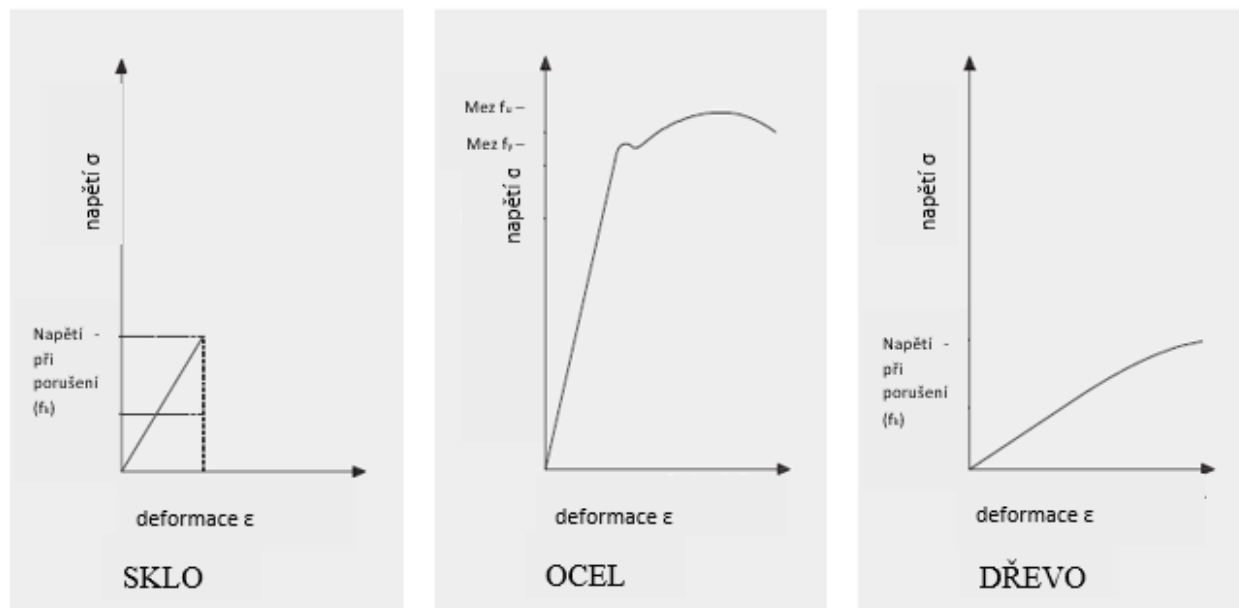


obr. 2.2: Výroba plochého skla plavením (tzv. float glass) [3]

Po vychladnutí se dále upravuje povrch skla např. broušením, pískováním nebo leptáním.

Materiál se chová zcela elasticky, po překročení únosnosti se tříští na velké střepy. Obvyklým typem porušení je křehký lom. Ztrátu únosnosti může způsobit nejenom náraz, ale i nadměrný ohyb, tah nebo namáhání teplotou. Nevýhodou skleněných prvků je fakt, že konstrukce

nevaruje před kolapsem optickým ani akustickým efektem. Maximální velikost skleněných tabulí je 3,21 x 6,0 m. [1][3][4][6][7]

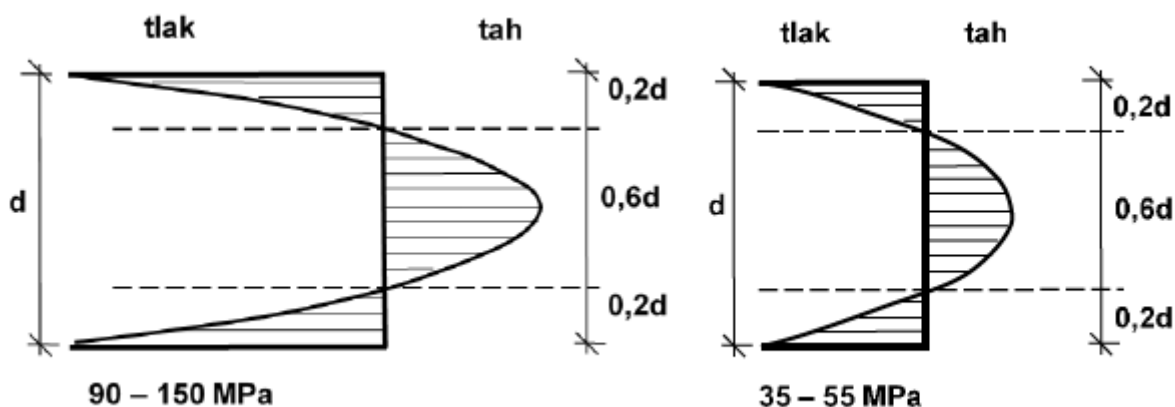


obr. 2.3: Porovnání pracovního diagramu pro materiál sklo, ocel a dřevo [7]

2.3.1. Tepelně zpevněné a tvrzené sklo

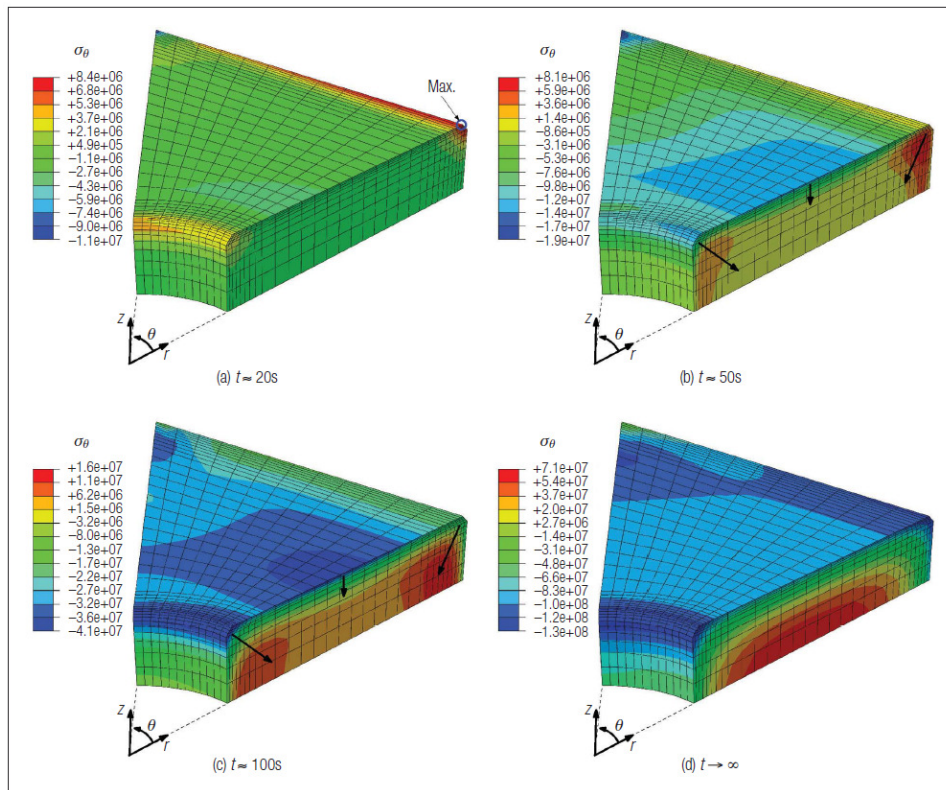
Podstatou úpravy je opětovné zahřátí obyčejného plaveného skla po výrobě na teplotu přibližně 620 °C. Následuje prudké ochlazení na pokojovou teplotu pomocí vzduchových trysek z obou stran skleněné tabule. Před procesem zpevňování se musí sklo upravit do požadovaných rozměrů a vytvoří se všechny otvory, po tomto procesu již není možné dodatečně tabule upravovat.

Prudkým ochlazením dochází ke vzniku vysokého teplotního gradientu mezi povrchem a vnitřkem materiálu, čehož důsledkem je vznik přídavných pnutí. Uvnitř materiálu se vytváří tahová napětí, na povrchu tlaková. Čím je ochlazení materiálu rychlejší, tím větší je přídavné napětí vložené do materiálu. Rozlišujeme tak sklo zpevněné (napětí 24 – 52 N/mm²) a sklo tvrzené (napětí 80 – 150 N/mm²).



obr. 2.4: Rozložení napětí v průřezu vlivem ochlazení [6]

Bylo zjištěno, že otvory pro šrouby nezpůsobují závažné změny v napětí v případě, že průměr otvoru je alespoň rovný tloušťce panelu. Chladný vzduch pak proudí otvorem, a místo se ochlazuje stejně, jako zbytek materiálu (viz obr. 2.5). [3]



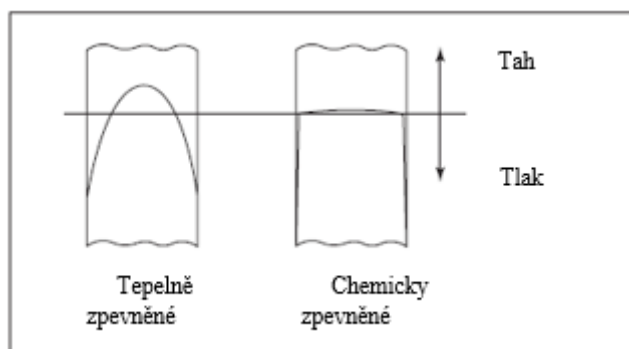
obr. 2.5: Ukázka procesu zpevnění materiálu v čase, čtvercový panel s dírou uprostřed [3]

Vlastnosti tepelně zpevněného skla jsou výhodné pro použití v konstrukcích, obyčejné plavené sklo není dostatečně pevné na nosné konstrukce a zcela tepelně tvrzené sklo se při porušení tříští na jemné střepy v celé ploše panelu, takže nemá žádnou zbytkovou únosnost. Díky přidávným napětím při sekundárním zahřívání zpevněné sklo také lépe odolává tepelnému namáhání a používá se jako druh bezpečnostního skla. [2][3][6]

2.3.2. Chemicky zpevněné sklo

Hlavní výhodou chemicky zpevněného skla oproti tepelné úpravě je menší deformace tabule při samotném procesu zpevňování a možnost zpevnění užších tabulí. Výsledkem je ale také mnohem menší vrstva, ve které vzniká přidávné napětí a tím pádem je tabule méně robustní, nevýhodou chemické úpravy je také vysoká cena.

Samotný proces obsahuje ponoření tabule do elektrolytické vany, kde se ionty sodíku na povrchu mění za draslík, který je o 30% větší. Tím je vytvořena externí vrstva pod tlakem. [3]



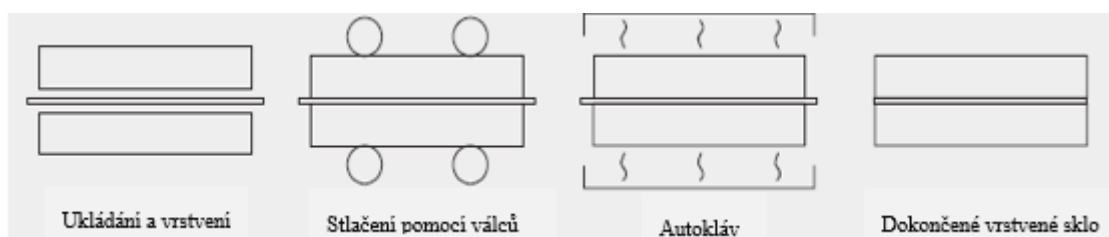
obr. 2.6: Rozdíl v napětí pro tepelně zpevněné sklo (vlevo) a chemicky zpevněné (vpravo) [3]

2.3.3. Vrstvené sklo

Ve stavebnictví se v největší míře, především na nosné konstrukce, používá vrstvené sklo (angl. laminated glass). Vrstvené sklo je složeno ze dvou nebo více vrstev skleněných panelů plaveného, zpevněného nebo tvrzeného skla. V současnosti je technologicky možné spojit k sobě více než 25 vrstev skla v celkové tloušťce přes 100 mm. Vrstva spojovacího materiálu mezi skleněnými tabulemi může být v tloušťce od 0,38 do 6,0 mm, nejčastěji se používá PVB fólie.

Ve stavebnictví se vrstvené sklo používá především díky přídavným funkcím mezivrstvy, v případě poruchy skleněné tabule zůstanou úlomky většinou stále připojené ke spojovací vrstvě a celá tabule se nevysype z rámu. Protipožární odolnost skla může být zajištěna intumescentní (zpěňovací) mezivrstvou, přidáním polykarbonátů do mezivrstvy se dá sklo zesílit proti mechanickému poškození. Měkká mezivrstva dokáže do určité míry zajistit neprůzvučnost a schopnost pohltit vibrace.

Spojení panelů je provedeno viskoelastickou vrstvou, jako jsou fólie z PVB, TPU, EVA nebo PE. Jednotlivé vrstvy skla jsou odděleny fólií a celá sendvičová konstrukce je v peci spojena při teplotě okolo 70°C. Následně je konstrukce stlačena mezi válci tak, aby došlo k odstranění vzduchových bublin ve spoji, poté se v autoklávu vytvrzuje při teplotě 140°C, tlaku 800 kN/m² a v prostředí bez přístupu kyslíku. PVB fólie má mít pevnost ≥ 20 N/mm² a minimální poměrnou deformaci $\geq 300\%$ pro poskytnutí dostatečné pevnosti a tažnosti. [2][3]



obr. 2.7: Schéma produkce vrstveného skla (laminated glass) [7]

Spojení může být provedeno také pryskyřicí, především akrylovou, polyuretanovou nebo polyesterovou. Skleněné tabule jsou páskou odděleny po obvodu a do meziprostoru se vylije spojovací materiál. Následně se hrany po obvodu zalepí také a celá konstrukce je v horizontální poloze vytvrzena chemickou reakcí, nebo přístupem UV záření. Maximální velikosti tabulí zde nejsou limitovány zařízením jako je autokláv a je možné takto spojovat i větší plochy. Pryskyřice zaručuje také lepší akustickou izolaci než PVB, při rozbití tabule však nezaručuje stejnou míru bezpečnosti. Obr. 2.8 znázorňuje typy použitého skla a jeho porušení. [7]



obr. 2.8: Rozdíl v porušení různých druhů vrstveného skla [6]

Všeobecně se vrstvené sklo spojené PVB fólií nebo pryskyřicí chová kompaktně při krátkodobém zatížení. Při dlouhodobém zatížení se však spolupůsobení materiálů zhoršuje, a každá vrstva přenáší zatížení v relativním poměru tuhostí. [3]

Zvýšená teplota vede u vrstveného skla k změknutí spojovacího materiálu a zhoršení spolupůsobnosti. Pokles smykové tuhosti je značný zejména u dvouvrstvého leštěného skla, na které může působit velmi silné sluneční záření. Únosnost vrstveného skla za zvýšených teplot je tedy závislá především na spojovací vrstvě. [3]

2.4. Vlastnosti konstrukčního skla - obecně

Charakteristickou vlastností skla je křehký lom (pracovní diagram skla na obr. 2.3). Dále je pro sklo typická nízká tepelná vodivost a vysoká propustnost světla v části viditelného spektra. Sklo jako takové je i odolné vůči vysokým teplotám, kritickou částí skleněných konstrukcí z hlediska požáru jsou jejich podkonstrukce a spoje (zpravidla z jiného materiálu). Některé materiálové vlastnosti jsou závislé na chemickém složení, zejména teplotní roztažnost se liší pro sodnovápenaté, borosilikátové a čisté silikátové sklo. [1][6][7][8]

Základní materiálové vlastnosti obyčejného plaveného skla:

Hustota $\rho =$	2 500 [kg/m ³]
Modul pružnosti E =	70 000 [MPa]
Modul p. ve smyku G =	30 000 [MPa]
Poissonova konstanta $\nu =$	0,23 [-]
Koeficient teplotní roztažnosti α	9×10^{-6} [K ⁻¹]
Tepelná vodivost $\lambda =$	1,0 [W/mK]
Emisivita $\varepsilon =$	0,89 [-]
Pevnost v tlaku $f_{c,k} =$	> 1000 MPa
<u>Pevnost v tahu $f_{t,k} =$</u>	<u>30 – 90 MPa</u>

Součinitel spolehlivosti pro výpočet, plavené sklo $\gamma_{M,A} = 1,8$

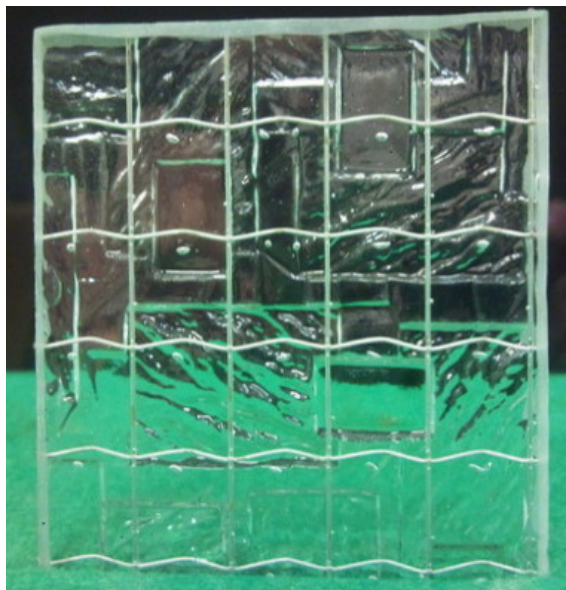
Součinitel spolehlivosti pro výpočet, tepelně upravené sklo $\gamma_{M,v} = 1,2$

2.5. Vlastnosti konstrukčního skla – zasklení s požární odolností

V současnosti se využívají tři druhy požárně odolného zasklení, které jsou považované za ekonomicky a funkčně uspokojivé a uživatelsky ověřené. Nutné poznamenat, že požární odolnost konstrukce je závislá nejen na druhu zasklení, ale především na provedení rámu, těsnění a osazení. Požadavky na požární odolnost pak musí splnit konstrukce jako celek.

Prvním a historicky nejstarším druhem je sklo s drátěnou vložkou, tzv. bezpečnostní sklo první generace. Při výrobě plochého válcovaného skla je dovnitř vložena a zalisována drátěná vložka, která zajišťuje zbytkovou stabilitu po rozbití skla (zamezí vypadnutí všech střepeň a zajistí tak částečnou celistvost). Tímto procesem se však zároveň do skleněné tabule vnese velké množství vad a nepřesností, zejména vzduchové kapsy, které pak snižují celkovou únosnost. Současná technologie umožňuje výrobu skla s drátěnou vložkou laminováním této vložky mezi dvě tabule skla. Ocelová vložka je opatřena z obou stran vrstvou speciální fólie, která zaručí soudržnost se sklem. Tento technologický postup odstraňuje předešlé nedostatky, tj. vznik vzduchových bublinek a minimalizuje možnost poškození při výrobě. Vlisováním drátěné vložky se také zlepšuje požární odolnost, ta je ovšem omezena pouze na mezní stav E (celistvost). [9][10][11]

Tepelně tvrzené sklo (nevrstvené) je dalším druhem zasklení s požární odolností, běžně dostupným na trhu. Sklo si zachovává svoji průhlednost i v průběhu požáru a může být aplikováno i ve velkých formátech. Vzhledem k absenci intumescentní vrstvy dosahují výrobky z tvrzeného skla mezních stavů maximálně EW 60. [12][13]



obr. 2.9: Drátosklo [11]



obr. 2.10: Použití tepelně tvrzeného skla Pyropane bez mezivrstev, letiště Lyon [12]

Vrstvené sklo, z tabulí tepelně zpevněných nebo tepelně tvrzených, je posledním a nejčastěji využívaným druhem požárně odolného zasklení v současnosti. Vrstva PVB fólie (nebo jiných mezivrstev) je zcela nebo z části nahrazena jednou nebo více vrstvami intumescentní fólie, která se při teplotách okolo 100°C mění v pevnou a neprůhlednou hmotu. Vrstvené sklo tak může dosáhnout požární odolnosti až EI 120. V případě nahrazení PVB fólie za intumescentní však ztrácí skleněná tabule svoje mechanické vlastnosti, které jsou přímo závislé na materiálu mezivrstvy a jeho schopnosti přenášet zatížení. Pro návrh nosných skleněných konstrukcí s požární odolností je proto možné volit pouze tepelně zpevněné nebo tvrzené panely. [8][10]



obr. 2.11: Vrstvené sklo v muzeu Rietberg (vlevo) a fasáda domu v Lanškrounu (vpravo) [5]

2.6. Spoje prvků a konstrukcí ze skla

Historicky se vývoj spojů skleněných konstrukcí zaměřoval na oddělení skla od ostatních nepoddajných materiálů (ocel, hliník aj.) pomocí měkkých podložek z plastu, pryže nebo dřeva, s cílem omezit špičky napětí vznikající při spojení dvou tuhých materiálů. Tento způsob řešení je stále standardní u mechanických spojů.

V současnosti se pro spoje skleněných konstrukcí používají tři hlavní způsoby:

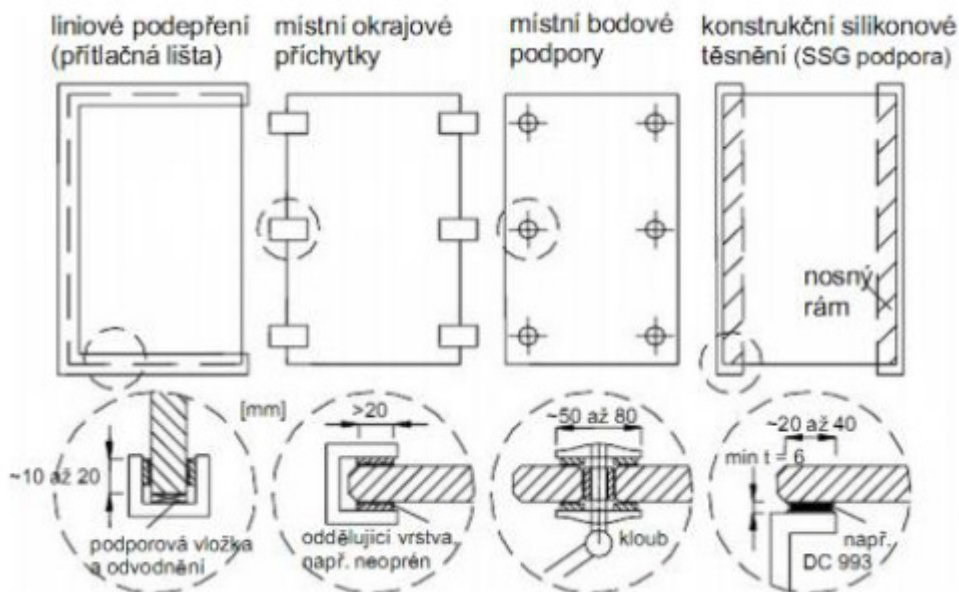
1) Mechanický spoj přenášející síly pomocí šroubů a vrtaných otvorů. Mezera mezi kovovým šroubem a skleněnou konstrukcí musí být vyplněna podložkou z tvrzeného plastu nebo obdobného materiálu, z důvodu omezení špiček napětí při styku materiálu ocel-sklo. V případě tvrdších podložek je třeba dbát zvýšené opatrnosti, při excentrickém působení sil na šroub může dojít k porušení spoje. Návrh tohoto spoje je zaměřený především na omezení lokálních napětí (špiček), která vznikají v jeho okolí, ale zároveň musí zaručit určitou flexibilitu z důvodu dilatačního pohybu konstrukce. Obyčejné plavené sklo většinou není schopné vydržet namáhání v oslabeném místě a je tedy nevhodné, pro tento spoj se proto používá výhradně tepelně zpevněné, tvrzené nebo vrstvené sklo.

2) Mechanický spoj přenášející smykové síly třením. Tento spoj se skládá z kovových svorek (systémových úchytů), připevněných k rámové podkonstrukci, a z vrstvy mezi sklem a svorkou, která zajišťuje tření. Tato mezivrstva je ve formě speciálního těsnění s vysokým součinitelem tření, které zaručí přenos sil v celé konstrukci. Třecí spoj se využívá především pro skleněné panely lehkých obvodových plášťů.

3) Zajištění přenosu sil lepeným spojem v jednom bodě (místní podporou), lineárním spojením (u hybridních nosníků a fasád), nebo plošným spojením jednotlivých prvků. Tento spoj musí odolat veškerým namáháním, jako je tah, tlak, smyk, kroucení, odlupování a další. Lepidlo zajistí rovnoměrné rozložení zatížení ve spoji. Problémem lepených spojů spočívá zejména v odolnosti lepidel proti klimatickým vlivům, chemickým a teplotním namáháním a také v nemožnosti spoj rozebrat po vytvrzení lepidla. [3][6][7][14]

2.6.1. Mechanický spoj

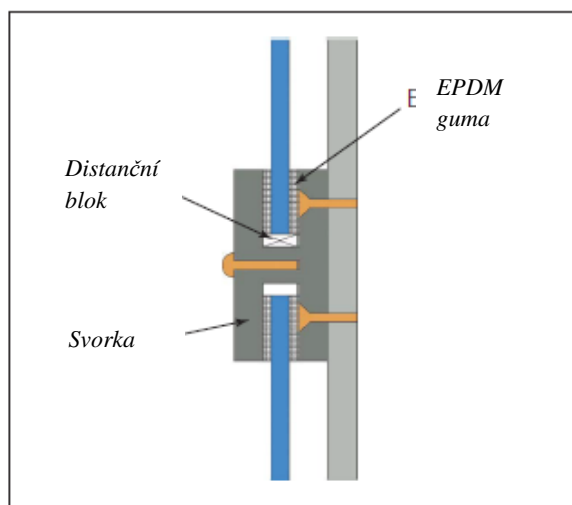
Mechanické spoje jsou stále nejvyužívanějším druhem pro spojování skleněných konstrukcí. Z hlediska návrhu celé konstrukce je výhodné využít velkou únosnost skleněné tabule při zatížení v její rovině. Tomu musí odpovídat i návrh spoje. Šroubovaný střížný, nebo třecí spoj je schopný přenést větší zatížení při stejných podmínkách, než spoj lepený. Výhodou oproti lepeným spojům je možnost výměny, opravy a demontáže spoje v průběhu životnosti konstrukce, bez poškození připojovaných materiálů. Mechanický spoj lze provést několika způsoby (obrázek 2.12).



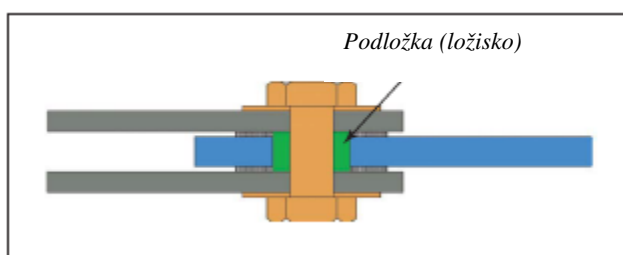
obr. 2.12: Způsoby řešení mechanického spoje skleněných konstrukcí [2]

Liniové podepření pomocí přitlačné lišty se speciálním těsněním vytváří v kombinaci s předpjatými šrouby jakosti 8.8 nebo 10.9 dostatečně velké tření k přenesení smykových sil. Těsnění v rámové podkonstrukci (liště) musí být stlačitelné, odolné proti uvažovaným vlivům na konstrukci a musí mít dostatečně vysoký součinitel tření. Konstruktivní řešení musí také zajistit vzájemnou separaci kovové části rámu od skleněného panelu. Při vhodně zvoleném způsobu těsnění se zatížení přenáší mezi panely rovnoměrně po obvodě skleněné tabule, a netvoří se slabá místa v konstrukci.

Místní okrajové přichytky (svorky) fungují na stejném principu přenášení sil, jako výše zmíněné liniové podepření. Spojovaný skleněný panel by měl mít pouze dvě mezery mezi svorkami, v tomto případě je třecí efekt zdvojnásobený. S využitím distančních bloků je zajištěno dostatečné spojení skleněných tabulí, a zároveň je umožněna dilatace prvků. Bloky mohou být vyrobeny z pryže, silikonu, neoprenu nebo jako podložky z EPDM, či obdobného materiálu (obr. 2.13). [14]



obr. 2.13: Spoj provedený svorkou [3]



obr. 2.14: Spoj provedený šroubem s ložiskem [3]

Místní bodové podpory, tvořené pouze šroubem a podložkou, jsou z estetického hlediska nejlépe vypadající, díky malé velikosti celého přípoje není významně narušen vzhled konstrukce. Menší plocha samotného spoje ale vyvoluje v konstrukci větší lokální napětí (špičky). Maximální napětí při porušení spoje závisí na počtu a průměru šroubů, pravidlem je navrhovat průměr šroubu alespoň stejně velký, jako je tloušťka skleněného panelu. Maximální únosnost jednoho šroubu se pohybuje okolo 30 kN. Tento druh spoje (obr. 2.14) je také náročný na provedení a kvalitu opracování otvoru. Otvor musí být o něco větší než samotný průměr šroubu pro výrobní tolerance a případné odchylky. Největší nevýhodou těchto spojů je vznik oslabeného místa v tabuli skla a také tepelného mostu. Pro tento tuhý spoj se musí použít tepelně zpevněné, tvrzené nebo vrstvené sklo s dostatečnou únosností, obyčejné plavené sklo není vhodné pro svoji menší pevnost. Vzniká zde i riziko spojené s uvolněním šroubů při vibracích, zejména u obvodových plášťů vystavených cyklickému zatížení s častým opakováním. [3][6][15]

Požární odolnost šroubovaných styčnicků kovových konstrukcí závisí přímo na požární odolnosti spojovaných prvků (jako nosníky, sloupy, aj.). Teplota oceli ve spoji je nižší než teplota v prvku, a to z důvodu přítomnosti dalšího materiálu. Předpokladem je vyplnění všech otvorů spojovacími prostředky. V takovém případě se neuvažuje porušení průřezu oslabeného otvory, tato skutečnost však platí pouze pro ocelové konstrukce, a je popsána v příloze D v [16]. U nosných šroubovaných spojů skleněných konstrukcí je třeba provést podrobnou analýzu pro posouzení jejich skutečné požární odolnosti. Návrhová únosnost kovových šroubů ve spojích se určí podle Tab. D. 1 v [17], v návaznosti na zatížení spoje. Výpočet je závislý na dílčím součiniteli materiálu za běžné teploty $\gamma_{M2} = 1,25$, součiniteli za požáru $\gamma_{M,fi} = 1,0$, a na redukčním součiniteli $k_{b,\theta}$. Součinitel $k_{b,\theta}$ upravuje únosnost šroubů na přibližně 90% z původní únosnosti při teplotě 300 °C, 75% při teplotě 400 °C a 55% při teplotě 500 °C. Při vyšších teplotách je redukce únosnosti šroubů mnohem větší. Redukce únosnosti pro šrouby platí i v případě spojů skleněných konstrukcí, v takových spojích je však rozhodujícím faktorem při určení požární odolnosti materiál mezivrstvy (podložky), která je obvykle hořlavá, nebo rychle ztrácí pevnost za zvýšených teplot. Ve srovnání s lepenými spoji (viz dále) je však únosnost šroubovaných spojů za požáru stále vyšší, samozřejmě záleží také na velikosti a jakosti šroubů, geometrii a zatížení samotného spoje.

2.6.2. Lepený spoj – úvod

Lepené spoje skleněných konstrukcí jsou oblíbené hlavně díky čistému vzhledu, který při použití transparentních lepidel nechá vyniknout všechny architektonické prvky. Výhodou je možnost spojování materiálů různých vlastností (např. ocel a sklo). Spojovaný materiál zůstává bez oslabených míst a spojení je homogenní, což umožňuje roznášet zatížení více rovnoměrně (u šroubovaného spoje vzniká velké lokální napětí, u lepeného nikoliv). Další výhodou je možnost spojování prvků s menší tloušťkou a celková menší hmotnost přípoje, stejně tak jako menší náchylnost spoje proti poškození vlivem vibrací.

Nevýhodou lepených spojů je nemožnost spoj upravit nebo demontovat po vytvrzení lepidla a velké nároky na úpravu spojovaných povrchů. Lepidla v přípoji jsou nepříznivě ovlivněna stárnutím, vysokými teplotami a klimatickými vlivy (UV záření, vlhkost), nepříznivě působí také dlouhodobá nebo cyklická zatížení.

Návrh lepeného spoje je velmi komplexní, a musí počítat se všemi fyzikálními, chemickými a mechanickými vlivy, a to po celý čas předpokládané životnosti konstrukce.

Návrh lepeného spoje přímo souvisí s výběrem vhodného spojovacího materiálu – lepidla. Spoj musí zajistit dostatečnou flexibilitu z důvodu pohybů způsobených vnitřním pnutím konstrukce, a zároveň odolávat všem výše zmíněným zatížením. V kapitole 3 předložené práce jsou dále popsány vybrané druhy lepidel, jejich vlastnosti za běžných a zvýšených teplot, chování v lepené spoji a aplikace v oblasti skleněných konstrukcí. [5][14]



obr. 2.15: Příklad využití lepeného spoje, Glass Dome, Stuttgart (CMU Architecture, 2009)

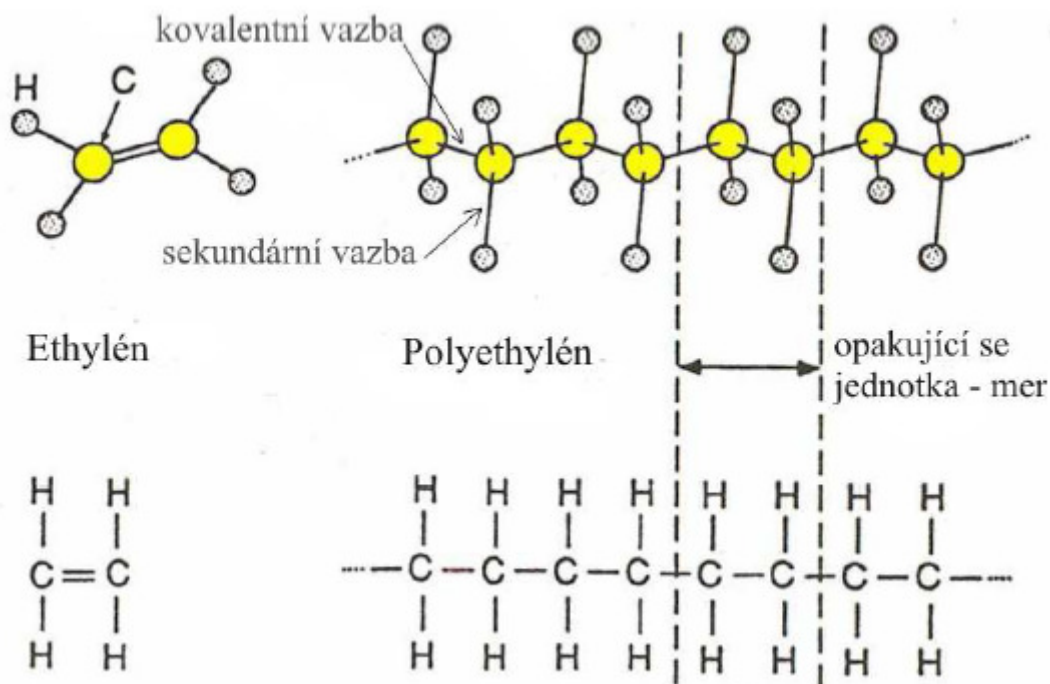
3. Konstruktivní lepidla – spojovací materiál ve stavebnictví

V současné době se jako stavební lepidla pro spojování konstrukcí nejčastěji používají polymery v různých úpravách, tato kapitola se věnuje výhradně těmto látkám resp. materiálům.

3.1. Chemická podstata polymerů

Chemicky se jedná o látky makromolekulární s dlouhým hlavním řetězcem atomů uhlíku. V hlavním řetězci se mohou také vyskytovat atomy kyslíku, vodíku, dusíku, chloru, fluoru a dalších látek, tyto atomy jsou spojeny primární vazbou (tzv. kovalentní). Tato vazba je velmi silná a je chemické podstaty. Atomy připojené k hlavnímu řetězci jsou navázány sekundární vazbou (tzv. Van der Waalsovou), která je poměrně slabá a její příčinou jsou přirozené a indukované dvojice kladných a záporných nábojů (elektrické dipóly). Charakter těchto sil má zásadní vliv především na rozpustnost a teplotu tání polymeru.

Za běžné teploty jsou polymery v pevném skupenství, v určitém stádiu zpracování se však mění na kapalinu a dají se tvarovat, za působení zvýšené teploty a tlaku. Makromolekuly mohou vzniknout buď z cyklických molekul jednoduchých monomerů, nebo z molekul obsahujících dvojnou vazbu. Tato základní stavební jednotka se nazývá mer (grafické znázornění obr. 3.1). Počet merů určuje polymerační stupeň, řetězce s malým počtem se nazývají oligomery, řetězce s vysokým počtem se nazývají polymery. [5][18][19]



obr. 3.1: Znázornění stavby monomeru (Ethylén) a polymeru (Polyethylén) [5]

Vlastnosti polymerů jsou odrazem jejich chemické, molekulové a nadmolekulární struktury. Chemická struktura makromolekul určuje základní vlastnosti polymerů, jako mechanické, tepelné, chemické a elektrické. Určuje také jejich hořlavost, míru nasákavosti a další. Velikost molekul je vyjádřena molární hmotností, ta je přímo úměrná polymeračnímu stupni. Polymerační stupeň je jedním z hlavních faktorů určující mechanické vlastnosti polymeru. [18]

Vlastnosti polymerů jsou závislé i na tvaru makromolekul (obr. 3.2 a Tab. 3.1). V jednoduchosti, lineární řetězce vznikají spojováním monomerních jednotek s dvěma funkčními skupinami, v případě vícefunkčních monomerů vznikají rozvětvené a síťované řetězce.



obr. 3.2: Tvary makromolekul a) lineární b) rozvětvené c) prostorově síťované [18]

Lineární makromolekuly jsou tvořeny pouze atomy s primární vazbou.

Rozvětvené makromolekuly mají na hlavním řetězci navázány atomy pomocí krátké sekundární vazby, čímž se zhoršuje pohyblivost celé makromolekuly. Atomy se tak nachází ve větší vzájemné vzdálenosti a dochází ke snížení mechanické pevnosti, teplotní odolnosti a dalších vlastností polymeru.

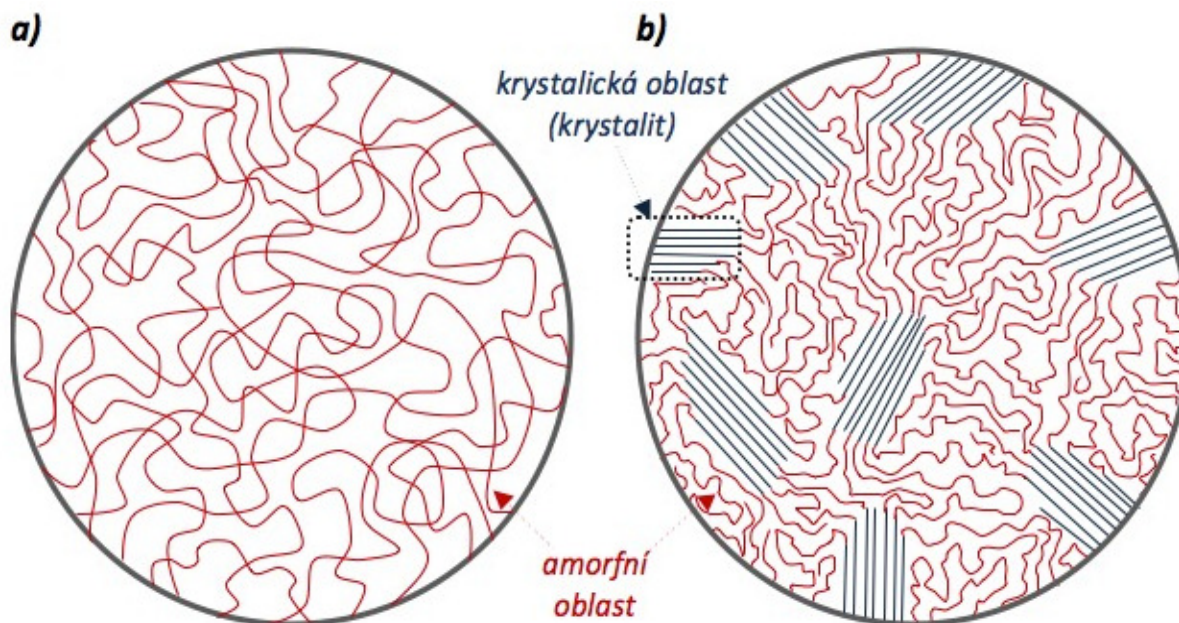
Síťované makromolekuly vznikají spojením sousedních lineárních řetězců. Tímto spojením se však zhoršuje celková pohyblivost všech spojených makromolekul a mění se vlastnosti polymeru. Zhuštěním atomů uvnitř sítě dochází ke zvýšení pevnosti, tepelné odolnosti a k výraznému snížení tažnosti polymeru. [5]

tab. 3.1: Rozdílné vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul [18]

LINEÁRNÍ	ROZVĚTVENÉ	SESÍŤOVANÉ
<ul style="list-style-type: none"> ▪ vyšší hustota materiálu ▪ vyšší pevnost ▪ vyšší modul pružnosti ▪ nižší tažnost ▪ vyšší teplotní odolnost ▪ dobrá tekutost taveniny ▪ snadná krystalizace 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nižší hustota materiálu ▪ nižší pevnost ▪ nižší modul pružnosti ▪ vyšší tažnost ▪ nižší teplotní odolnost ▪ nižší tekutost taveniny ▪ nižší schopnost krystalizace 	<p><i>Vlastnosti závisí na hustotě sítě. S vyšší hustotou sítě se materiál vyznačuje zpravidla:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ vysokou pevností ▪ vysokým modulem pružnosti ▪ vysokou teplotní odolnosti ▪ velmi nízkou tažností

Nadmolekulární struktura vyjadřuje vzájemné uspořádání makromolekul v celkové struktuře látky. V tavenině při výrobě jsou makromolekuly polymeru v amorfním stavu (tj. uspořádány nepravidelně). Při ochlazování taveniny se však mohou některé makromolekuly uvnitř polymeru uspořádat pravidelně, tomuto procesu se říká krystalizace. Strukturu polymeru však nikdy nelze stoprocentně uspořádat, polymery s alespoň částečně pravidelnou strukturou se

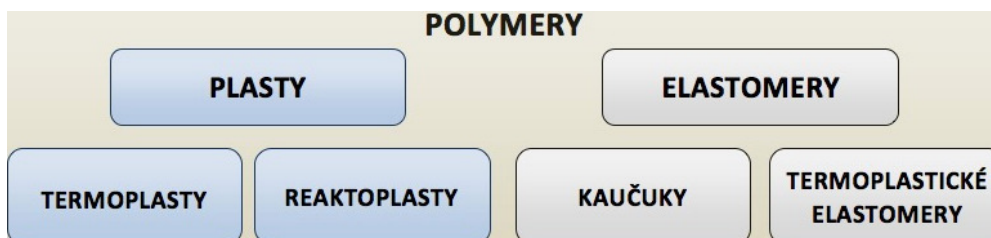
nazývají semi-krystalické. Vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalické oblasti se mění vlastnosti polymeru, jako je ztráta průhlednosti, snížení tažnosti a houževnatosti, a zvyšuje se jeho hustota, pevnost a tvrdost. [18][19]



obr. 3.3: Nadmolekulární struktura a) zcela amorfní b) semi-krystalická [18]

3.2. Dělení polymerních lepidel

Základní dvě skupiny polymerů tvoří elastomery a plasty, které se dále dělí podle vlastností. Rozdělení polymerů je znázorněno na obr. 3.4.



obr. 3.4: Rozdělení polymerů

3.2.1. Elastomery

Elastomery jsou vysoce pružné polymery s visko-elastickým chováním a nízkým modulem pružnosti. Výhodou těchto polymerů je možnost relativně malou silou látku značně deformovat bez porušení. Tato deformace je vratná (elastická), to zajišťují kovalentní vazby hlavních řetězců se schopností měnit uspořádání a rozdělovat napětí. Elastické chování je závislé na teplotě, při nízké teplotě (pod teplotou skelného přechodu) je materiál méně pružný. V oblasti lepidel jsou nejběžnější silikony a jednosložkové polyuretany, používané k těsnění a tmelení.

3.2.2. Plasty

Plasty v chemii jsou látky nebo materiály s opačným chováním než elastomery, většinou tvrdé a často i křehké. Deformace plastů jsou trvalé, a poměrné pružné deformace jsou velmi malé. Plasty se dále rozdělují podle chování při zvýšených teplotách.

3.2.2.1. Termoplasty

Termoplasty při zahřívání měknou a lze je tvarovat. V případě zahřívání nad teplotu tání přechází v taveninu, ochlazením se vrací do původního, tuhého stavu. Tento proces je opakovatelný, vratný, a materiálové změny jsou pouze fyzikálního charakteru. Tento druh plastů má většinou vysoký stupeň polymerace. V oblasti lepidel se jedná především o látku polyvinylbutyral (PVB), výše zmíněnou v souvislosti s vrstveným sklem.

3.2.2.2. Termosety

Termosety, nebo také reaktoplasty, patří k materiálům, které jsou tvarovatelné a tavitelné pouze krátkou dobu po prvotním zahřátí. Zahříváním nad teplotu cca 200 °C se chemickou reakcí původní molekuly propojí do husté sítě a vzniká tak nevratná změna v materiálu. Tato reakce se nazývá vytvrzování a jejím následkem je nárůst teploty skelného přechodu, což znamená lepší odolnost proti působení vysokých teplot. Opětovné zahřívání materiálu vede k rozkladu dříve, než se začne samotný materiál tavit. Mezi význačná lepidla této řady patří akryláty, dvousložkové polyuretany nebo epoxidové a polyesterové pryskyřice. [5][18]

4. Chování konstrukčních lepidel ve spoji za běžné teploty

4.1. Všeobecně

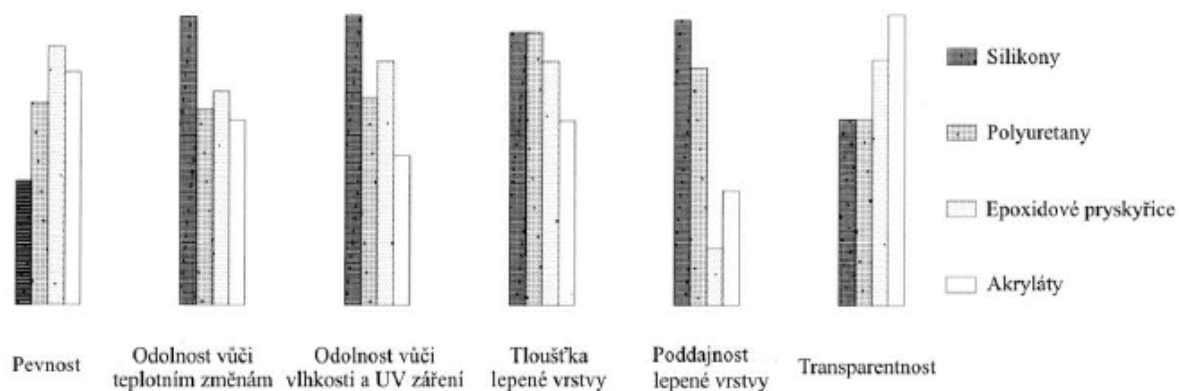
Jak již bylo zmíněno, správné a bezpečné připojení dvou materiálů pomocí lepeného spoje je komplexní návrh, který musí co nejvíce minimalizovat riziko poškození nebo kolapsu konstrukce v průběhu celé její životnosti. Při návrhu lepeného spoje záleží hlavně na vlastnostech lepidla, geometrii spoje a zatížení působícího na spoj. Lepidla s modulem pružnosti E větším než >50 MPa mohou zapříčinit porušení skleněné konstrukce dříve, než dojde k deformaci samotného spojovacího materiálu, riziko hrozí především v případě nerovností a mikrotrhlin na povrchu skla a při excentrickém působení sil na spoj. [14]

Pro stavební konstrukce se používají dva hlavní typy lepidel:

Prvním typem jsou stavební lepidla na bázi silikonu nebo polyuretanu, která jsou pružná a měkká. Silikonová lepidla fungují dobře při rovnoměrném zatížení, zpravidla se nanáší ve větších tloušťkách. Hůře odolávají smykovým silám a dlouhodobým zatížením, ale mají dobrou odolnost vůči teplotním změnám, vlhkosti a UV záření. Tato lepidla tvoří tzv. poddajný (netuhý) spoj.

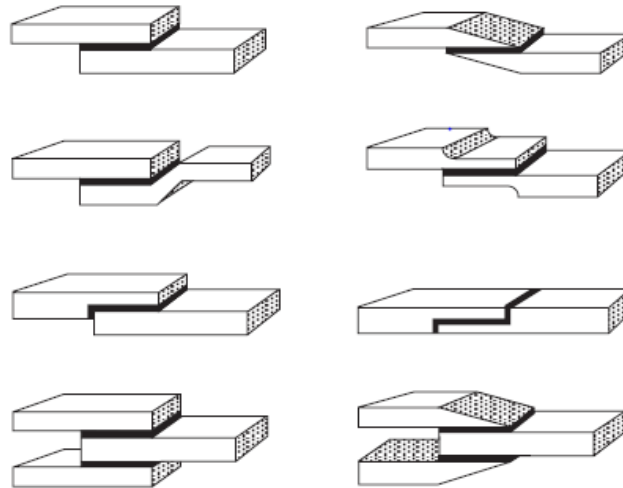
Druhým typem jsou tuhá lepidla na bázi epoxidových pryskyřic a akrylátů. Tento druh lepidel je v oblasti pozemního stavitelství relativně neprobádaný a probíhá jeho neustálý výzkum. Jejich hlavní výhodou oproti měkkým je možnost spolupůsobení spojených konstrukcí a vysoká pevnost spoje. Na druhou stranu je při využití tuhých lepidel spoj mnohem více namáhán vnitřním pnutím, které vzniká při nerovnoměrných tloušťkách naneseného lepidla, nerovnostech na lepeném povrchu nebo hranách skleněné tabule. Lepidla se nanáší v tenkých vrstvách okolo 1 - 2 mm. Termická odolnost těchto lepidel je oproti silikonům zpravidla horší, výjimku tvoří pouze speciální polymerní lepidla na bázi fenolových pryskyřic, případně polyimidu.

Při kolapsu většinou dochází k porušení skla, velmi tuhé lepidlo je zpravidla pevnější částí spoje.



obr. 4.1: Vlastnosti různých druhů lepidel [5]

Pro poddajný i tuhý spoj platí, že nejhůře odolávají namáháním působící kroucení a odlupování. Uspořádání stykových ploch lepených prvků by proto mělo co nejvíce omezit vznik excentricity a koncentrace napětí, výhodné je prvky zkosit nebo spoj opatřit příložkou. Vhodné geometrické řešení spoje s ohledem na zmenšení koncentrace napětí je znázorněno na obr. 4.2. [5][20]

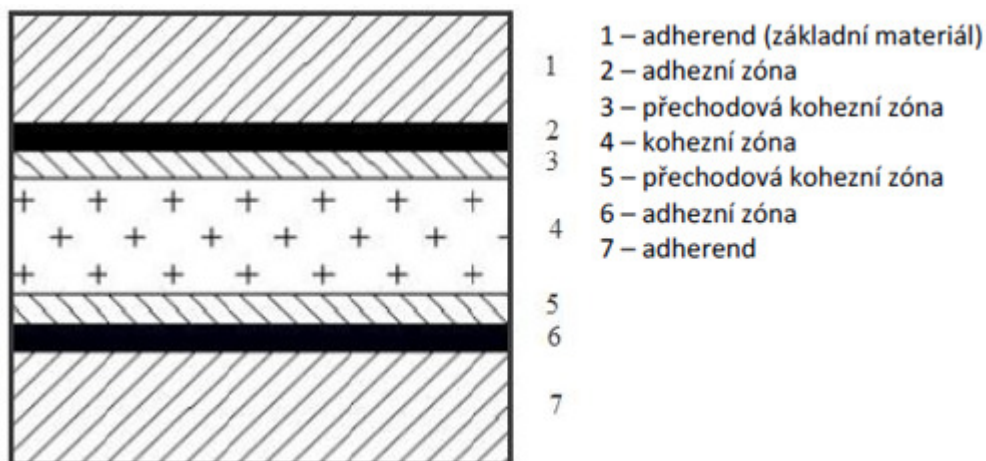


obr. 4.2: Vhodné řešení geometrie lepeného přeplátovaného spoje

4.2. Teorie lepení, princip adheze a koheze

Lepidlo jako spojovací materiál je v okamžiku lepení v kapalném stavu, to zaručí dokonalé přilnutí k lepeným povrchům. Samotná pevnost přípoje závisí hlavně na těchto parametrech:

- adheze, neboli přilnavost lepidla k povrchu lepeného materiálu (adherend)
- koheze, neboli soudržnost samotného lepidla, také označovaná jako vnitřní pevnost
- smáčivost povrchu lepeného materiálu (důležité z důvodu rozprostření kapalného lepidla)
- pevnost lepeného materiálu

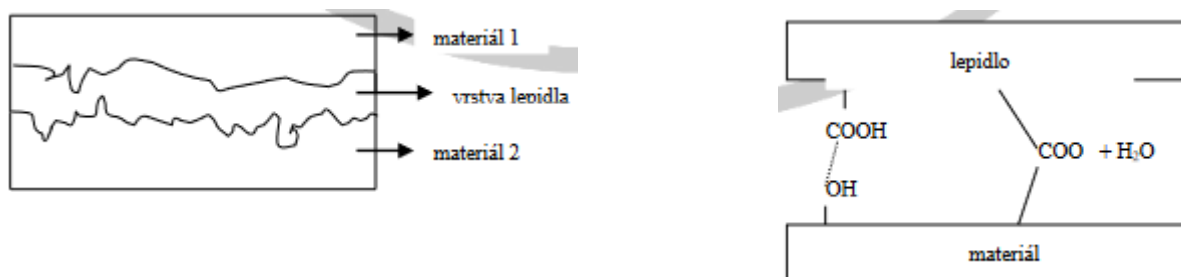


obr. 4.3: Popis vrstev ve spoji dvou lepených materiálů [6]

4.2.1. Adheze

Adhezivní síly se rozdělují na mechanické a chemické. Mechanická síla působí pouze v případě porézních nebo členitých materiálů, kdy lepidlo zatéká do otvorů nebo záhybů a tvoří se tak

výstupky, které jsou schopné přenést působení sil mechanicky. Tento přenos se u hladkých povrchů jako je sklo obyčejně zanedbává. Chemické síly tvoří sekundární (van der Waalsovy) přitažlivé síly mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu, z hlediska přilnavosti jsou však významnější kovalentní vazby tj. přímé chemické působení lepidla na povrch. Mezi vysoce reaktivní se řadí například epoxidové pryskyřice. Při nedostatečné adhezi lepeného spoje se porušení projeví mezi vrstvou lepidla a lepeného materiálu.



obr. 4.4: mechanické působení adhezních sil (vlevo) [21]

obr. 4.5: chemické působení adhezních sil (vpravo) [21]

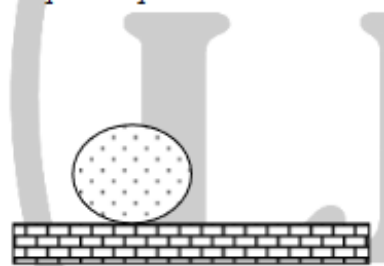
4.2.2. Koheze

Kohezní síly závisí na chemickém složení lepidla resp. na síle jeho chemických vazeb. Pravidlem je, že dvousložková lepidla mají vysokou kohezi, měkká a jednosložková lepidla nízkou. Při nedostatečné kohezi se spoj při namáhání poruší ve vnitřní vrstvě lepidla.

4.2.3. Smáčivost

Smáčivost povrchu vyjadřuje schopnost rozprostřít lepidlo po povrchu lepeného materiálu rovnoměrně. Při špatném rozložení lepidla není možný vznik adhezní vazby. Smáčivost závisí na povrchovém napětí lepidla, samotného povrchu a souvisí s polaritou materiálu. Molekuly lepidla jsou elektricky jednostranně orientovány (jsou polární), zrovna tak polární povrchy dobře smáčí. Touto polaritou materiálů vzniká povrchové napětí, platí pravidlo čím větší, tím lepší. V případě, že je povrchové napětí materiálu větší než napětí lepidla, dojde k rozlití lepidla rovnoměrně po povrchu. Sklo je silně polárním materiálem, který je i v případě hladkého povrchu vhodný k vytvoření lepeného spoje. [6][21]

Kapalina povrch nesmáčí:



Kapalina povrch smáčí:



obr. 4.6 povrch nesmáčí (vlevo) a povrch smáčí (vpravo) [21]

4.3. Chování lepených spojů v závislosti na tuhosti

4.3.1. Poddajný spoj – netuhý

K provedení poddajného přípoje skleněných konstrukcí se nejčastěji používají elastomery, především lepidla na bázi silikonu a polyuretanu. Polyuretanová lepidla mají spíše průmyslové využití, ve stavebnictví převažují poddajná silikonová lepidla a jejich modifikace.

V počátcích aplikace adheziv ve stavebnictví se používaly silikony zejména ke spojení skleněné tabule s podkonstrukcí rámu u fasád výškových budov, označované také jako SSG (obr. 2.12). Z hlediska aplikace silikonů je výhodná jejich parotěsnost i akustická izolace, naopak jsou tyto materiály nevhodné pro přenášení větších smykových zatížení v nosných spojkách. Následující tabulka hodnotí obecné technické parametry pro jednosložkové a dvousložkové silikony.

tab. 4.1: Obecné technické parametry jednosložkových a dvousložkových silikonů

Druh silikonu ->	Jednosložkový	Dvousložkový
Způsob tvrzení	Okolní prostředí	Polymerace pomocí katalyzátoru
Doba tvrzení	Až 3 týdny	Max. 3 dny
Minimální tloušťka lepidla	6 mm	6 mm
Maximální šířka spoje	20 mm	50 mm
Ideální poměr tloušťka x šířka	1:2	1:4

Experimentálně určená pevnost v tahu na malých vzorcích se pohybuje v rozmezí 0,8 – 1,8 MPa. Návrhová pevnost pro nosné konstrukce je vzhledem k visko-elastickému charakteru materiálu mnohem nižší, tato lepidla se využívají pro spojování pouze méně namáhaných konstrukcí. Maximální povolená deformace (protažení) silikonů je 12,5%.

Tento druh lepidel je výhodný zejména pro využití v lineárním, nebo dynamicky namáhaném spoji, s možností aplikace lepidla na větší styčnou plochu. Nízký modul pružnosti spojovacího materiálu umožňuje lépe vyrovnat koncentrace napětí. Použitím těchto měkkých lepidel se dá také dobře redukovat vliv výrobních nepřesností a mikrotrhlin na spoj, při zvolení vhodné tloušťky lepidla nedojde ani k narušení pevnosti. [5][20]

4.3.2. Nepoddajný spoj – tuhý

K provedení tuhého přípoje skleněných konstrukcí se nejčastěji používají reaktoplasty, především epoxidové pryskyřice a akryláty. Charakteristická je především velmi malá tloušťka lepidla (okolo 1 mm), malá schopnost protažení a jeho vysoká pevnost. Tuhý spoj se volí pro nosné konstrukce, u kterých je nutné zajistit dostatečnou pevnost.

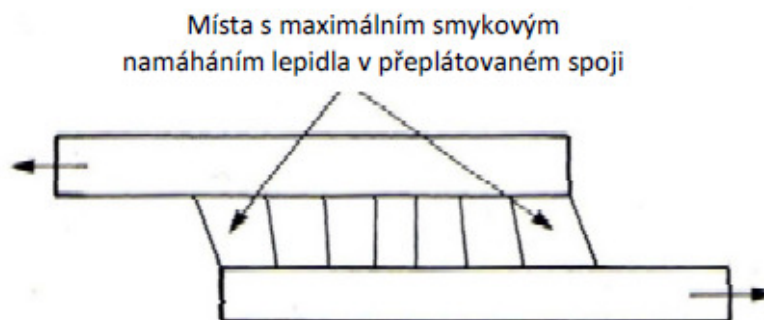
Lepené povrchy jsou však mnohem náročnější na úpravu, spoj je náchylnější k vadám způsobeným nepřesností povrchů, nerovnoměrnou vrstvou naneseného lepidla nebo k technologickým chybám (nedodržení podmínek při aplikaci aj.). Při použití lepidel s modulem pružnosti větším než >50 MPa pak při kolapsu dochází k porušení skla, které má

zpravidla menší odolnost, použití takových lepidel se nedoporučuje ke spojování skleněných konstrukcí.

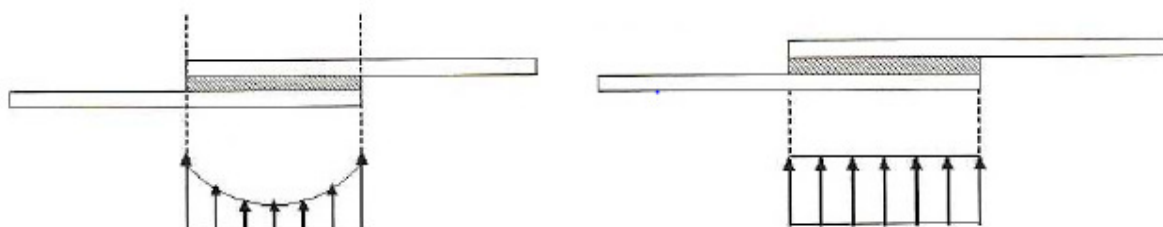
Z estetického hlediska jsou akrylátové pryskyřice žádané díky svojí transparentnosti. Dvousložkové akryláty vznikají reakcí katalyzátoru s akrylovou kyselinou. Některá lepidla nemusejí mít své složky předem smíchané v přesném poměru a ke spojení dojde difuzí, minimalizuje se tak riziko selhání lepené konstrukce z důvodu špatného technologického postupu. Druhým typem těchto lepidel jsou jednosložkové UV-akryláty, které se vytvrzují za působení UVA záření (vlnová délka okolo 400 nm), nebo i denního světla. Výhodou lepidel na bázi akrylátů je odolnost proti vlhkosti a UV záření.

Epoxidové pryskyřice jsou tvořeny z více cyklicky se opakujících monomerů, volbou složek pryskyřice a vytvrzující látky se dá u tohoto typu lepidel dosáhnout mechanické, tepelné i chemické odolnosti, izolačních a dalších užitečných vlastností. Vývoj a aplikace těchto lepidel je pro účely stavebnictví aktuálně nejúspěšnější.

Při namáhání smykem jsou krajní místa spoje vždy namáhána mnohem více, než střed. To je dáno nelineárním rozdělením napětí v průřezu spoje (viz obrázek 4.8 a 4.9). Při zvětšení délky samotného lepeného spoje se snižuje smykové napětí, výhodné je tedy navrhovat spoje s co největší délkou. Zaoblená vrstva lepidla na konci spoje, vzniklá technologickou výrobou, dále redukuje skutečné působení smykového napětí vzhledem k teoretickým předpokladům. Skutečné maximální smykové napětí činí pouze 70-85% teoretického napětí stanoveného výpočtem. Použití pevných lepidel umožňuje vytvořit tuhý spoj nosné konstrukce, návrhová pevnost lepidla stanovená jeho výrobcem však není stejná, jako pevnost celého spoje. Doporučuje se spoje nosných konstrukcí vždy experimentálně ověřit.



obr. 4.8: Místa s maximálním smykovým namáháním lepidla v přeplátovaném spoji [5]



obr. 4.9¹: Rozdělení smykového napětí tuhý spoj (vlevo) a poddajný spoj (vpravo) [20]

¹ Smykové napětí je ve všech spojih vždy s vyšší koncentrací v krajní části spoje, obrázek pouze ilustruje významný rozdíl v poměrné velikosti těchto krajních koncentrací pro oba druhy spoje.

5. Chování konstrukčních lepidel ve spoji za zvýšené teploty

5.1. Všeobecně

Předložená diplomová práce a především její výzkumná část se týká návrhu lepených spojů za zvýšených teplot, resp. za požáru. Návrh lepeného spoje skla pro účely nosných konstrukcí je velmi složitý, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů po celou dobu životnosti, musí spoj kromě mechanického zatížení dobře odolávat také dlouhodobým účinkům okolního prostředí. Současné působení několika vlivů dohromady je zpravidla mnohem závažnější, než uvažování samotných vlivů odděleně.

Nelze se tedy při návrhu lepeného spoje pro skutečnou konstrukci spolehnout pouze na znalosti a experimenty již uskutečněné, většinou je třeba před návrhem provést několik testování v laboratoři i v reálném prostředí. Možnosti testování jednotlivých prvků a spojů jsou však finančně a časově omezené, zejména pak cyklické zkoušky vlivů prostředí a vliv stárnutí lepidel. [20]

Standardním laboratorním testem smykové pevnosti, jako je např. ASTM D1002 apod., se provádějí a vyhodnocují zkoušky, které nepřinášejí aplikovatelné informace a výsledky o komplexním chování lepidel ve spojích. Zrychlené testování vlivů prostředí (tzv. accelerated environmental testing) je metoda, kdy se výsledky zkoušek při zvýšeném působení například vysoké teploty nebo vlhkosti extrapolují, akcelerace vlivů prostředí má zjednodušeně představovat dlouhodobé působení vlivů na prvek. Tento druh zkoušek však také nepřináší dostatečné informace o chemických změnách v lepidlech, které mohou být způsobeny skutečným dlouhotrvajícím působením okolních vlivů nebo cyklických zatížení. Dosud nebyl vynalezen způsob, jakým by se dalo zajistit a spolehlivě určit chování lepidel v konstrukčních (především nosných) spojích, s ohledem na dlouhodobé působení zatížení a negativních vlivů. V rámci vývoje lepených spojů je nutné provést mnohem více experimentů, zejména pro navrhování nosných spojů nebo spojů s dlouhou životností.

Z úvodu k této kapitole tedy vyplývá, že i přes veškeré získané informace z odborných článků a již provedených experimentů, se pro návrh lepeného konstrukčního spoje v prostoru s požárním rizikem musí uvažovat nejen působení vysokých teplot za požáru, ale také např. relativní vlhkost prostředí za běžné teploty, cyklické namáhání spoje (větrem, vibracemi, aj.), možnosti chemických reakcí s látkami v okolním prostředí a další vlivy, které by mohly samotný spoj nepříznivě ovlivnit. Právě proto je návrh nosných lepených spojů tak obtížný, a chování spoje je do jisté míry nepředvídatelné.

V dalším textu se práce věnuje především vlastnostem lepidel za zvýšených a vysokých teplot. Závěrem je vyhodnocení z hlediska použitelnosti těchto lepidel v konstrukčních spojích. [20][22]

5.2. Chemické faktory ovlivňující odolnost proti teplotě

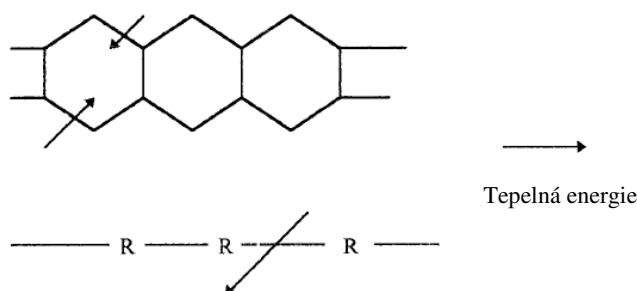
Teplota je jedním z nejhorších vlivů degradace organických lepidel. V běžné praxi se lepených spojů ve stavebnictví nevyužívá v prostředí se zvýšenou teplotou (cca 250 °C a více), z důvodu rozkladu polymerů nebo nedostatečné znalosti spolupůsobení všech vlivů na spoj (nejistota

návrhu). Z chemického hlediska vykazují reaktoplasty nejlepší mechanické vlastnosti za vysokých teplot.

Při návrhu požárně odolného spoje resp. lepidla je nutné porozumět jeho chování a chemickým reakcím uvnitř látky. Faktory nejvíce ovlivňující hmotu při vystavení lepidla nadměrnému tepelnému zatížení jsou oxidace a pyrolýza. Důsledkem takového zatížení je především:

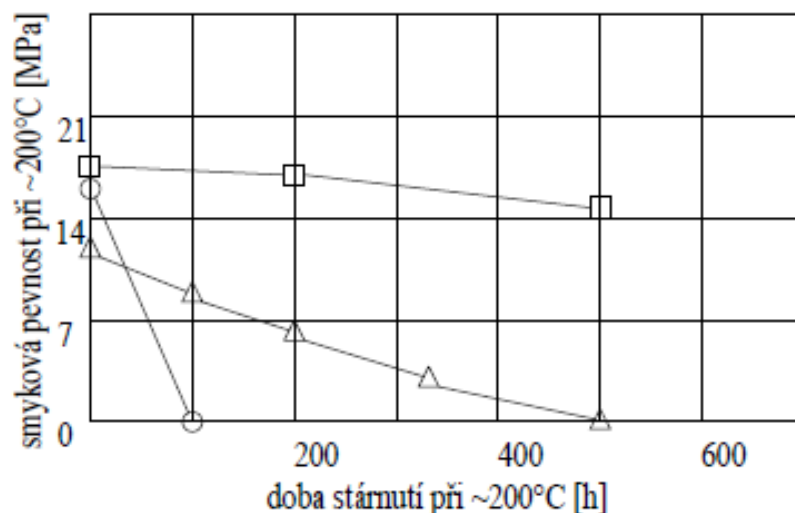
- dělení molekul polymeru, které vyústí v rozdělení řetězců, snížení celkové molekulární hmotnosti a snížení kohezní síly lepidla
- vytváření nových příčných vazeb uvnitř polymeru, které vyústí v zkřehnutí a smrštění lepidla
- odpařování plastifikátorů uvnitř materiálu, které vyústí v zkřehnutí lepidla
- oxidace (v případě, že je možná tato reakce v lepidle), vyústěním je snížení kohezní síly lepidla a oslabení okrajových vazeb (vrstev lepidla)

Z těchto faktorů je zřejmé, že pro dosažení stability musí být materiál lepidla vhodně upraven tak, aby měl vysoký bod měknutí a byl odolný proti oxidaci. Výše zmíněné reaktoplasty jsou proto výhodné, protože prakticky nemají bod měknutí a jejich silně provázaná struktura molekul umožňuje lepidlu udržet si své mechanické vlastnosti při nadměrných teplotách při minimálním tečení (změknutí). Obrázek 5.1 ukazuje rozdíl v degradaci přímého a provázaného polymerního řetězce.



obr. 5.1: Tepelná energie potřebná k rozdělení jednoduchého a provázaného řetězce [20]

Vliv oxidace při stárnutí lepidla za zvýšené teploty je patrný z obrázku 5.2, na kterém je znázorněna redukce smykové únosnosti epoxy-fenolové pryskyřice. Vzorky byly vystaveny oxidaci na vzduchu a v inertním prostředí. Graf mimo jiné ukazuje také, že spojovaný materiál může hrát významnou roli při urychlení procesu oxidace. Bylo prokázáno, že oxidace probíhá pomaleji při spojení prvků z hliníku, než při spojení prvků z oceli. Při spojování skleněných konstrukcí je však vliv oxidace ve srovnání s kovy zanedbatelný. [20][22][23]



obr. 5.2: Redukce smykové únosnosti vlivem oxidace při stárnutí a) □- inertní prostředí, nerezová ocel b) △- oksyločené prostředí, hliník c) ○- oksyločené prostředí, nerezová ocel [20]

5.3. Druhy lepidel odolných vůči namáhání teplotou

Před začátkem srovnání lepidel a jejich použití za zvýšených a vysokých teplot je nutné poznamenat, že experimentální testování lepidel ve většině případů probíhá za teplot v rozmezí 50 – 200 °C. Vzhledem k velkému poklesu pevnosti za vysokých teplot (+300 °C) se u mnohých druhů nepočítá s jejich využitím v konstrukcích s požadavky na požární odolnost. Dále jsou vybrány a popsány druhy lepidel, které jsou v současnosti aplikovatelné do provozů se zvýšeným tepelným namáháním. [20][24]

5.3.1. Konstrukční silikon

Silikonové pryskyřice jsou již dlouhou dobu známé pro svoji termickou stabilitu při pracovních teplotách do 315 °C. Zkouškou byla prokázána pevnost v odlupování (peel strength), při spojení se sklem, o velikosti 4,2 N/mm, s minimální redukcí pevnosti až do 230 °C. Materiál po vystavení teplotě vyšší než 250 °C však velmi rychle ztrácí pevnost. Silikonová lepidla se ve stavebnictví používají pouze do těsnění, jako speciální pásy a jiné. Relativně slabá kohezní síla, nízká smyková pevnost a vysoká pružnost prakticky znemožňuje využití konstrukčního silikonu pro tuhé (nosné) lepené spoje konstrukcí. [20]

5.3.2. Epoxidové pryskyřice

Běžné epoxidové pryskyřice jsou limitované pro aplikace v teplotách pod 125 °C. V případě použití vytvrzujících přísad nebo reaktantů v podobě anhydridů (BTDA, PMDA aj.) dochází k větší provázanosti vazeb, což vede ke zvýšené termické odolnosti. Tyto pryskyřice upravené pomocí anhydridů jsou schopné vydržet krátkodobé namáhání do 232 °C, v případě vystavení dlouhodobému tepelnému namáhání (v řádech týdnů) je jejich použití omezeno teplotou 150 °C. Největší výhodou epoxidových pryskyřic je možnost jejich strukturu snadno upravovat a vylepšit tak jejich vlastnosti dle požadavků aplikace. [20][24]

5.3.3. Modifikované fenolové pryskyřice

Největší úspěch z hlediska termické stability má spojení epoxidových a fenolových pryskyřic. Odolnost fenolů proti působení vysokých teplot se pojí s výbornými adhezními vlastnostmi epoxidů. Lepidla postavená na bázi spolupůsobení fenolových a epoxidových molekul jsou schopná vydržet krátkodobé namáhání při teplotách do 370 °C, dlouhodobé namáhání je možné do 175 °C. Takto modifikované fenolové pryskyřice jsou často preferované před ostatními druhy termicky odolných lepidel, a to z důvodu jednoduché technologie vytvrzování, relativně nízké výrobní ceny a velké škály aplikací nejen ve stavebnictví. Výhodou je také malé přetvoření materiálu při vytvrzování.

Dalším druhem modifikátorů jsou nylonová vlákna a různé elastomery. Všechny tyto systémy mají relativně dobrou pevnost v odlupování tj. 1,75 – 2,6 N/mm, nicméně mají menší pevnost ve smyku. Pevnost ve smyku celkově klesá po dosažení 175 °C. [20][24]

5.3.4. Polyimidy a aromatické pryskyřice

Polyimidy se řadí mezi polyaromatické pryskyřice, stejně jako polybenzimidazol a bismaleimid. Robustnost aromatických molekulárních řetězců zaručuje výjimečné termické vlastnosti těchto lepidel. Aromatické molekuly vyžadují mnohem více energie k jejich štěpení nebo rozdělení a prakticky fungují jako pohlcovač tepelné energie. Tato robustnost však zároveň omezuje využití aromatických pryskyřic jako těsnících prvků.

Redukce pevnosti polyimidů při krátkodobém působení teplot okolo 540 °C je o něco lepší než u modifikovaných fenolů, nicméně celková redukce pevnosti je stále významná z hlediska použitelnosti. Při teplotách větších než 260 °C však polyimidy vykazují nejlepší vlastnosti ve srovnání s ostatními lepidly pro komerční použití. Na druhou stranu, proces vytvrzování vyžaduje prostředí vakua a teploty do 340 °C při současně aplikaci tlaku. Tento proces je zejména náročný pro spojovaná velkých nebo geometricky složitých substrátů, také je velmi nákladný. [20]

5.3.5. Polybenzimidazol

Polybenzimidazol (PBI) je polymerní lepidlo na bázi aromatických molekul a poskytuje vůbec nejlepší vlastnosti při krátkodobém působení vysokých (zvýšených) teplot. PBI pryskyřice však velmi rychle degradují vlivem oxidace a nedoporučuje se jejich použití v prostředí s trvalou teplotou vyšší než 230 °C. Použití je stejně jako u polyimidu limitováno vysokou cenou a náročným procesem vytvrzování. [20]

5.3.6. Bismaleimid

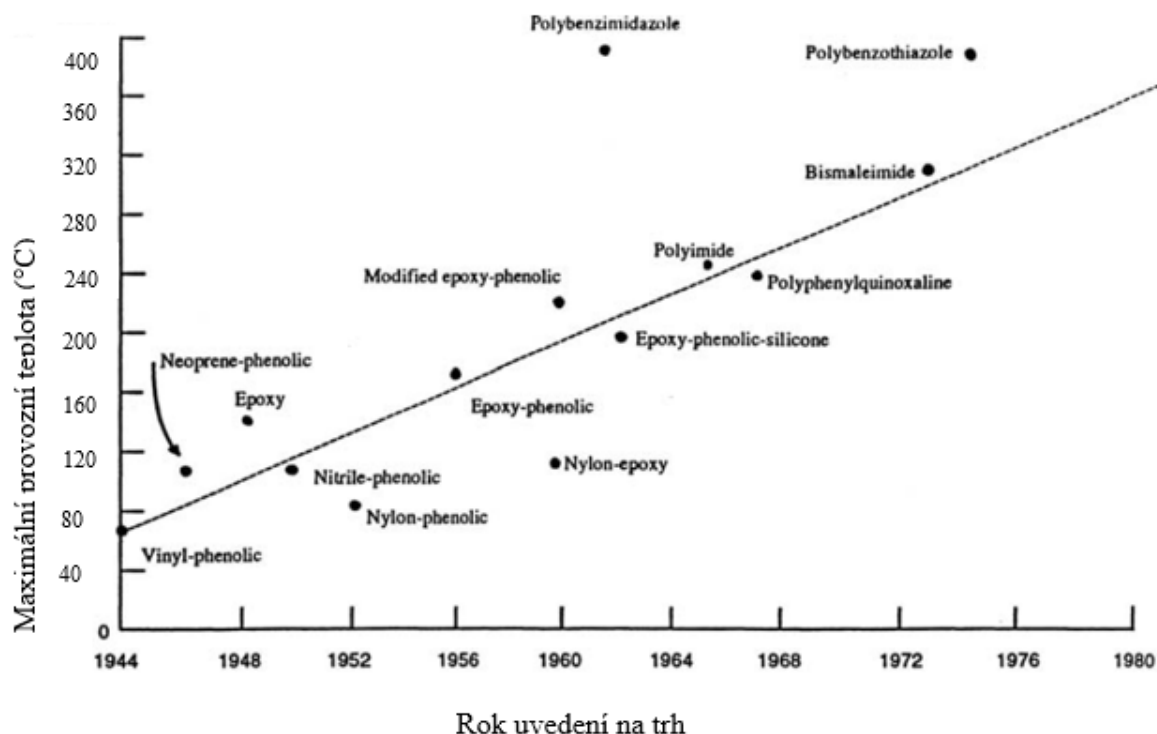
Lepidla na bázi bismaleimidů jsou především vhodná k aplikaci v oblasti elektrotechniky. Chemické řetězce jsou robustní, opět platí, že tím pádem je únosnost v odlupování relativně nízká. Do 300 °C je redukce únosnosti lepidla v mezích použitelnosti (avšak omezená), krátkodobé vystavení lepidla teplotám do 230 °C je víceméně bez ztráty únosnosti. Velkou výhodou bismaleimidů, mimo jejich výborné elektrické vlastnosti, je také možnost je kombinovat s aditivami a reaktanty prakticky neomezeně, stejně jako u epoxidových pryskyřic. [20][24]

5.3.7. Kyanoakryláty

Přidáním složek, vytvářejících provázanou polymerní strukturu do formule kyanoakrylátů, se dá vytvořit materiál lepidla se smykovou pevností podobnou jako u epoxidových pryskyřic. Výhoda těchto lepidel je teoretická možnost spojit jakýkoliv materiál a výborné adhezivní vlastnosti, nicméně pevnost je drasticky redukována při teplotách nad 200 °C. [20]

5.4. Závěr rešerše

Ještě před vyhodnocením současných možností v oblasti konstrukčních lepidel a jejich aplikace při zvýšených teplotách, potažmo za požáru, je třeba zmínit, že zkoušení lepidel za zvýšených teplot je v neustálém vývoji. V současnosti je ale tento vývoj zaměřen spíše na automobilový a letecký průmysl, a aplikace adheziv ve stavebnictví za vysokých teplot není prioritní pro aktuální vědecké projekty. Dostupné informace a studie se také ve většině případů přímo nedotýkají požární oblasti, a jsou často přejaté z výše zmíněných průmyslových oborů.

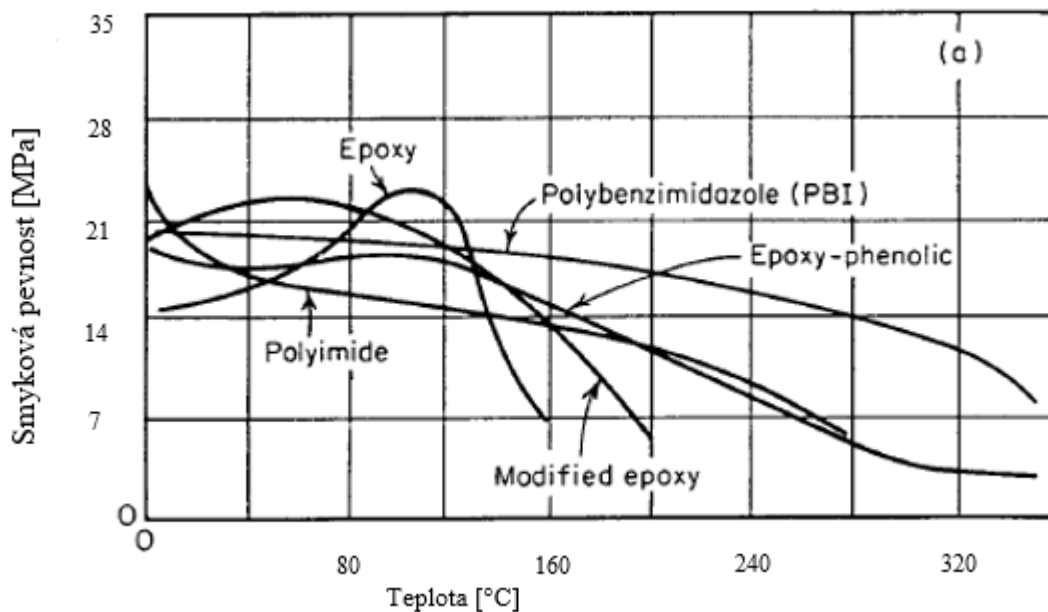


obr. 5.3: Maximální provozní teplota vybraných lepidel a jejich rok objevení, obrázek je pouze informativní [23]

Z předešlého textu vyplývá, že konstrukční silikonová lepidla, stejně jako kyanoakrylátová a epoxidová, nejsou velmi vhodná pro aplikace do nosných resp. konstrukčních lepených spojů, vystavených zvýšeným teplotám, a to ani krátkodobě. Lepidla nemají dostatečnou únosnost, nebo robustnost struktury, aby vydržela namáhání způsobená požárem ve fázi rozhořívání. Epoxidová lepidla jsou výborná pro tuhé spoje v prostředí s běžnou teplotou. Jedinou výjimku tvoří jednosložkové epoxy pryskyřice s procesem vytvrzování za zvýšené teploty, díky tomuto procesu se při vyšších teplotách zhuští polymerní struktura, a lepidlo tak získá velmi dobrou termickou odolnost.

Modifikované fenolové pryskyřice jsou výhodné z hlediska pořizovací ceny a jednoduché aplikace. Stejně jako ostatní lepidla nemají velmi dobrou únosnost při působení dlouhodobých

tepelných namáhání, spoj by však mohl být dostatečně únosný při namáhání teplotou za požáru ve fázi rozhořívání. Právě aplikovatelnost, relativně nízká cena a vlastnosti příznivé pro návrh konstrukčních spojů jsou hlavním předpokladem pro širší využití těchto lepidel ve stavebnictví. Polyimidy, bismaleimidy a lepidla na bázi aromatických molekul se vyznačují nejlepší odolností proti tepelnému namáhání, to zaručuje především robustnost a silná provázanost molekulární struktury. Z toho důvodu jsou však tato lepidla také velmi tuhá, v porovnání s lepidly na bázi modifikovaných fenolových pryskyřic mají horší pevnost v odlupování a také horší adhezi k některým povrchům. Náročné podmínky pro vytvrzení a vysoká cena těchto lepidel dále negativně ovlivňují jejich použitelnost ve stavebnictví. V budoucnu by mohly být některé druhy těchto lepidel více dostupné pro účely stavebnictví. [20][22][23][24]



obr. 5.4: Srovnání smykové pevnosti vybraných lepidel pro spoje převážně hliníkových, nebo ocelových konstrukcí [20]

6. Výzkumná část práce – cíle a metody k jejich dosažení

Výzkumná část předložené práce je zaměřena na zkoušky těles malých rozměrů. Výzkum lepených spojů na Fakultě stavební je podpořen grantem ČVUT č. SGS18/169/OHK1/3T/11 a grantem GAČR č. GA18-10907S.

6.1. Cíle diplomové práce

Hlavním cílem výzkumné části bylo provedení zkoušek lepených spojů za zvýšených teplot. Vzorky těles představovaly lepený nosný spoj v konstrukci namáhaný smykem, za současného působení zvýšené teploty. Hodnotila se smyková pevnost jednotlivých vzorků a způsoby jejich porušení. Vedlejším cílem práce bylo vytvoření numerických modelů, pro které byla použita data získaná ze zkoušek.

6.2. Metody k dosažení cílů

V rámci předložené práce proběhly zkoušky v laboratoři Katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Pro zatížení vzorků sloužil certifikovaný zkušební stroj s pecí, viz 7.3. Samotné vzorky se skládaly ze středového plechu, k němuž byl nalepeno z každé strany těleso. Zkoušený vzorek byl následně uchycen mezi dva boční hliníkové díly, díky kterým bylo možné vyvodit ve spoji smykové napětí. Celá zkušební sestava je podrobně popsána v dalších kapitolách. Tato zkušební metoda již byla úspěšně aplikována výzkumníky na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí v rámci jiných zkoušek lepených spojů v malém měřítku a je dostatečně přesná pro potřeby této práce.

Pro sestavení numerických modelů byl zvolen výpočetní software ANSYS 2019 R2. Software je krátce představen v kapitole 8.1.



obr. 6.1: Business park Lotus, Mumbai 2014 – požár v budově s prosklenou konstrukcí obvodového pláště, skleněné střepy dopadaly do velké vzdálenosti od fasády

7. Výzkumná část práce – zkoušky těles malých rozměrů

Provádění zkoušek je nedílnou součástí aplikace lepených spojů ve stavebnictví. Z důvodu velkého množství faktorů, ovlivňujících celkovou únosnost a životnost spoje v konstrukci, se v současnosti před použitím ve skutečné konstrukci vždy provádí víceetapové testování spoje. Zkoušky jsou také nejvíce průkazným způsobem, jak určit mechanické vlastnosti (nejen) lepených spojů.

V rámci výzkumu chování lepených spojů za zvýšených teplot byly provedeny zkoušky vzorků (těles), které byly zkoušeny ve smyku za současného působení teplotního namáhání. Měřenou veličinou bylo smykové napětí a posun bočních dílů na vzorku. Určující z hlediska chování spoje byl také způsob jeho porušení, který se měnil v závislosti na okolní teplotě a použitých materiálech.

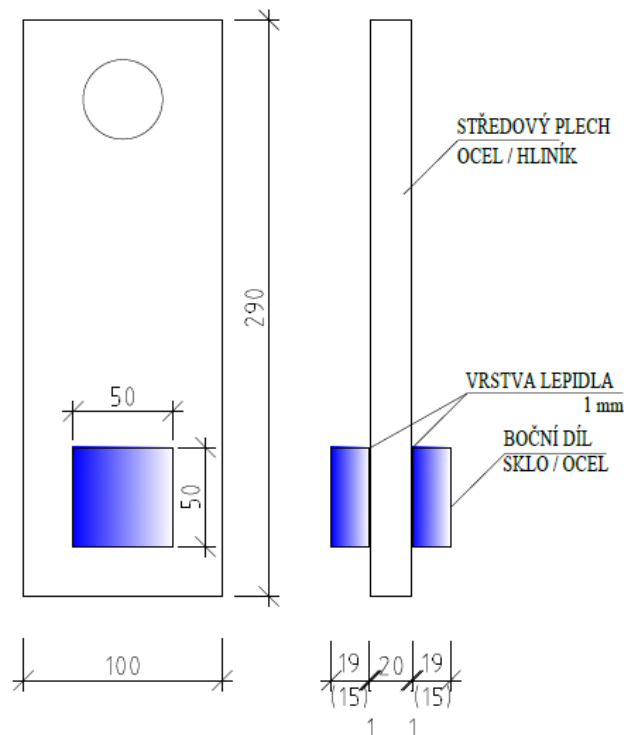
Zkoušky byly rozděleny na dvě části. První část zkoušení proběhla v květnu 2020 s lepidlem značky Scott Bader (Crestabond) a se vzorky se skleněným bočním dílcem. Vzorky byly zatíženy menší teplotou do 80 °C a to z důvodu malé termické odolnosti použitého lepidla. Druhá část zkoušení proběhla v lednu 2021, vzorky s lepidlem značky Permabond byly sestaveny s ocelovým bočním i středovým dílcem, bez skleněného substrátu. Tyto vzorky byly zatíženy teplotou 200 °C a 230 °C. Hodnocení dosažených výsledků je obsaženo v závěru této kapitoly.

7.1. Zkušební tělesa – technologie výroby, značení a možné porušení vzorků

Pro potřeby zkoušek byla navržena tělesa tak, aby bylo možné je uchytit do zkušebního stroje a zároveň byla lepená spára zatěžována rovnoměrně, s omezením veškerých přídatných napětí ve vzorku.

Zkušební tělesa byla sestavena jako dvojitě přeplátovaný spoj, viz obr. 7.1. Střední část byla tvořena plechem z pozinkované oceli nebo hliníku (slitina EN AW 6060 nebo EN AW 5005), s rozměry 100 x 290 x 20 mm. Na středový plech byly z obou stran nalepeny boční dílce z plaveného skla o rozměrech 50 x 50 x 19 mm. V případě zkoušek s lepidlem Permabond ES5504 (viz kapitola 7.5) nebylo možné použití bočních dílců z plaveného skla, a tedy byly nahrazeny variantou z konstrukční oceli o rozměrech 50 x 50 x 15 mm. Celková plocha lepeného spoje byla 5000 mm². Veškeré stykové plochy byly před aplikací lepidla očištěny acetonem nebo izopropylalkoholem, ocelové a hliníkové povrchy byly před lepením navíc zdrsňeny drátěnkou Scotch-Brite.

Pro obě dále popsaná lepidla byla zvolena shodná tloušťka vrstvy 1 mm (v souladu s technickými listy lepidel). Pro dosažení potřebné tloušťky byly do vrstvy lepidla přidány skleněné kuličky o průměru 1 mm. Skutečná tloušťka vrstvy lepidla a lepených dílů v jednotlivých vzorcích byla před zkoušením znovu měřena, pro získání přesných údajů.



obr. 7.1: Geometrické schéma zkušebního tělesa [mm]

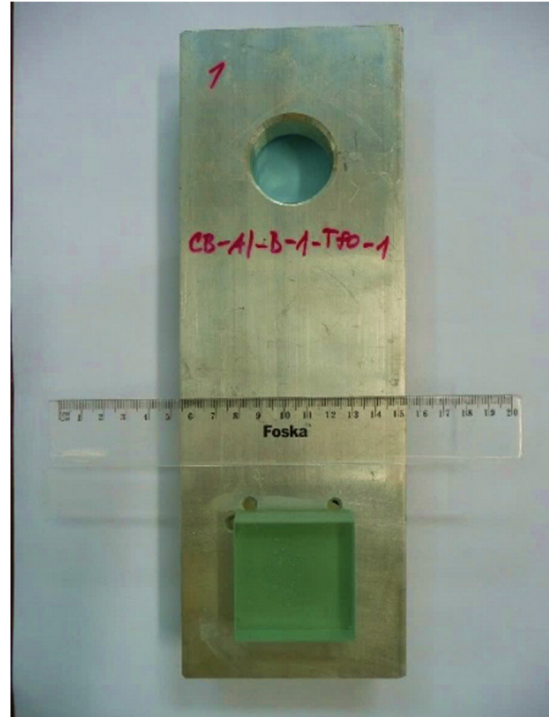
Značení zkušebních těles bylo provedeno jednotně pro všechny sady. Celkem bylo pro účely zkoušek vytvořeno 32 vzorků, z toho 4 sady po 5 vzorcích pro první část zkoušek a dále 3 sady po 4 vzorcích pro druhou část zkoušek za vyšších teplot. Značení je vysvětleno na obr. 7.2.

DRUH LEPIDLA		TL. LEPIDLA	TEPLOTA
Cb = Crestabond	1 mm	1 mm	R = 22°C (referenční)
Pb = Permabond			T60 = 60°C
			T80 = 80°C
			T200 = 200°C
			T230 = 230°C

Cb - Al - B - 1 - R - 1

DRUH PLECHU	POVRCH	POŘADÍ VZORKU
Al = hliníkový	B = broušený	rozmezí 1-4 nebo 1-5
Zn = pozink. ocel		

Obr. 7.2: Značení zkušebních těles



Obr. 7.3: Fotografie před nalepením bočního dílu (vlevo) a po nalepení bočního dílu (vpravo)

Způsoby porušení vzorků jsou znázorněny na obr. 7.4. Při vyhodnocení výsledků zkoušek se způsoby porušení zaznamenaly pouze písmeny:

A – adhezní

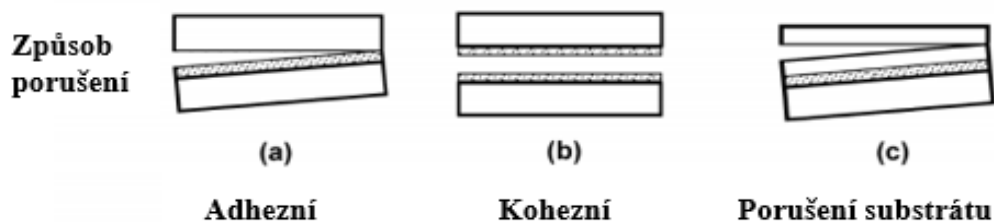
K – kohezní

A-K – adhezně kohezní s převládajícím adhezním porušením

A-K – adhezně kohezní s převládajícím kohezním porušením

S – porušení substrátu

V případě adhezního porušení se oddělila vrstva lepidla od lepeného povrchu, ta zůstala takřka neporušená. Poškození spoje nastalo mezi lepidlem a středovým plechem, nebo mezi lepidlem a bočním dílcem. V případě kohezního porušení došlo přímo k poškození vrstvy lepidla, která nedokázala přenést napětí vyvozené uvnitř materiálu. U některých vzorků došlo ke kombinaci těchto porušení, tedy adhezně-kohezní. V případě porušení substrátu došlo k překročení pevnosti skla v tahu, vrstva lepidla nedosáhla meze únosnosti.



Obr. 7.4: Možné způsoby porušení zkušebních vzorků [6]

7.2. Použitá lepidla

Použitá lepidla byla vybrána s ohledem na materiálové a geometrické řešení zkušebních vzorků. Vzhledem k návrhu těles, která mají představovat nosný dvojité přeplátovaný konstrukční spoj, byla vybrána lepidla tužší, s výrobcem udávanou smykovou pevností 17 – 22 MPa (s hliníkovým substrátem). Lepidlo Crestabond® M7-05, použité v první části zkoušek, je limitováno maximální provozní teplotou okolí do 100 °C. Pro druhou část zkoušek bylo vybráno lepidlo Permabond ES5504 s maximální provozní teplotou přesahující 200 °C, výrobce udává při dosažení 200 °C pevnost lepidla více než 90% z jeho původní pevnosti.

Technické listy pro obě lepidla jsou součástí přílohy předložené práce.

7.2.1. Scott Bader Crestabond® M7-05

Pro první část zkoušek bylo vybráno dvousložkové konstrukční metylmetakrylátové lepidlo Crestabond. Lepidlo je určené pro širokou škálu substrátů jako kovy, plasty nebo kompozitní materiály. Výrobce udává vysokou pevnost ve smyku, odloupení, tahu a také dobrou odolnost vůči vnějším vlivům prostředí.

Lepidlo bylo dodáno v kartuších s míšícím poměrem složek 1:1. Výrobce udává manipulační dobu (otevřený čas) 4 – 7 minut. Doba tvrdnutí po sestavení spoje činí 18 – 22 minut. Doporučená teplota při aplikaci lepidla je 18 – 25 °C, doporučená maximální provozní teplota lepidla je 100 °C. Lepidlo je určeno pro spoje o tloušťce vrstvy 1 – 5 mm. Barva lepidla po vytvrzení je bílá.

Lepidlo bylo aplikováno pomocí výtlačné pistole s míšícím nástavcem, který zajistil řádné promíchání obou složek. Lepené povrchy požadovaly před aplikací lepidla pouze očištění a odmaštění, pro zvýšení adheze bylo doporučováno povrch zdrsnit.

7.2.2. Permabond ES5504

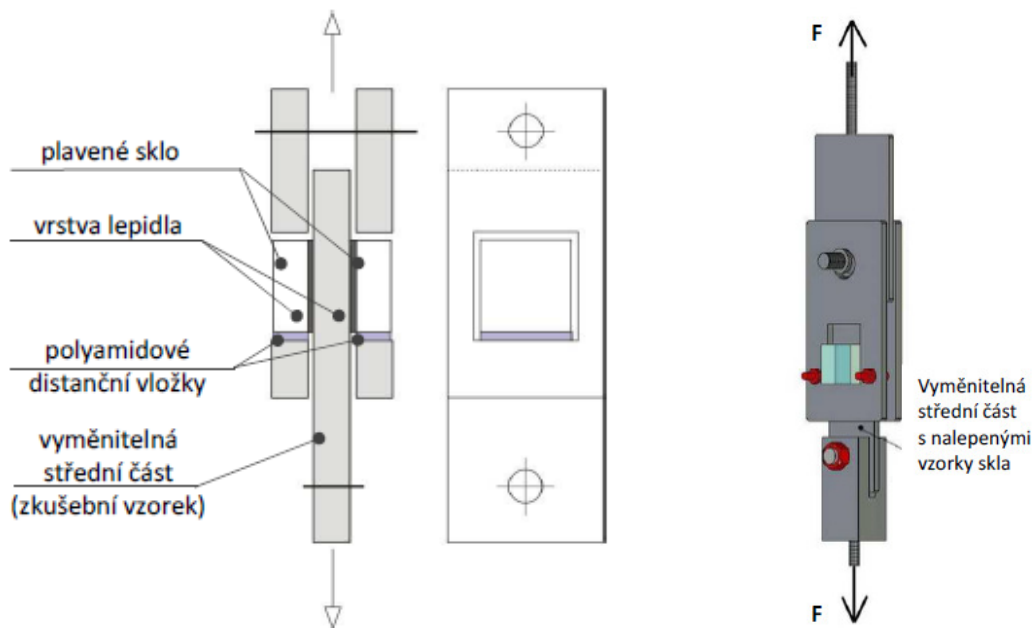
Pro druhou část zkoušek bylo vybráno jednosložkové konstrukční epoxy lepidlo Permabond. Důvodem pro výběr právě tohoto lepidla byla především výrobcem udávaná vysoká pevnost lepidla i při ohřátí na cca 200 °C. Lepidlo by mělo krátkodobě vydržet i působení nad 200 °C, nicméně pevnost lepidla po překročení této teploty rapidně klesá. Lepidlo je stejně jako Crestabond určeno pro širokou škálu substrátů. Výrobce udává rovněž vysokou pevnost ve smyku, odloupení, dobrou odolnost vůči vibracím a chemikáliím a výbornou termickou odolnost.

Vytvrzení lepidla probíhá za zvýšené teploty, výrobce udává dobu tvrdnutí 1 hodinu při 150 °C a poté 1 hodinu při 200 °C. Vzhledem k této skutečnosti je samotný proces lepení technologicky jednodušší, není omezen otevřeným časem lepidla. Celý proces vytvrzování však trvá podstatně déle (ve srovnání s lepidlem Crestabond) a zajištění zvýšené teploty pro tvrzení může být v praxi také technologicky náročnější. Lepidlo je určeno pro spoje o tloušťce vrstvy do 2 mm. Barva lepidla po vytvrzení je šedá.

Lepidlo se aplikuje pomocí vytlačovací pistole. Lepené povrchy nevyžadují žádné úpravy, pouze očištění a odmaštění.

7.3. Zkušební sestava

Zkoušky vzorků, popsaných v kapitole 7.1, byly provedeny na certifikovaném zkušebním stroji Shimadzu AG-X 300kN, který byl připojen k měřicí ústředně Spider 8. Při zkouškách za zvýšených teplot byly vzorky umístěny do certifikované zkušební pece TCE-N300 stejného výrobce. Pro upnutí vzorků do stroje byly použity dva boční hliníkové dílce s výřezem, které byly sestaveny pro účely těchto zkoušek. Pomocí těchto dílců bylo možné vyvodit smykové napětí ve vrstvě lepidla, s minimálním vznikem přidavných namáhání. Vrstva skla byla oddělena od bočních hliníkových dílců polyamidovou vložkou, aby nedocházelo ke koncentraci napětí mezi oběma tvrdými materiály. Sestava je znázorněna na obr. 7.5 a 7.6.



obr. 7.5: Schéma zkušební sestavy [5]



obr. 7.6: Zkušební sestava v peci (vlevo) a sestava referenční sady (vpravo)

V první části (lepidlo Crestabond) byly zkoušeny celkem 4 sady po 5 vzorcích. První a druhá sada byla referenční, tj. zkoušena za teploty 22 °C. Pro první sadu byl použit hliníkový plech, pro druhou ocelový plech. Třetí sada byla zkoušena se středovým plechem z hliníku za teploty 80 °C a čtvrtá se středovým plechem z pozinkované oceli za teploty 60 °C. Sestava byla zatěžována tahem (obr. 7.5), při rychlosti zatěžování 1 mm/min. Posun bočního dílce (a z něho dopočítaná poměrná smyková deformace) byl měřen potenciometry s maximálním posunem 25 mm. Na každé straně byl umístěn jeden potenciometr.

V druhé části (lepidlo Permabond) byly zkoušeny 3 sady po 4 vzorcích. První sada byla referenční, tj. zkoušena za pokojové teploty. Druhá sada byla zkoušena za teploty 200 °C a třetí sada za teploty 230 °C. Všechny vzorky této části byly pouze s ocelovým středovým plechem. Z důvodu vyšších teplot uvnitř zkušební pece nebylo možné instalovat potenciometry tak, jak tomu bylo v první části zkoušek. V tomto případě sloužil pro odečet přetvoření pouze posun příčnicku zkušebního stroje, ústředna nebyla při těchto zkouškách zapojena. Rychlost zatěžování vzorků byla shodná 1 mm/min.

Naměřené hodnoty zatížení a posunů byly vyhodnoceny v tabulkovém editoru MS Excel. Výstup zatížení ze zkušebního stroje ve voltech byl nastaven na převod 1 V = 20 kN, případně 1 V = 60 kN. Smykové napětí ve spoji bylo získáno zjednodušeně analytickým výpočtem ze síly působící na spoj, vzorec $\sigma = \frac{F}{A}$. K tomu byl přiřazen odpovídající posun, resp. poměrná smyková deformace. Modul pružnosti ve smyku G pro lepidlo byl vyjádřen vztahem $G = \frac{\tau}{\gamma}$.

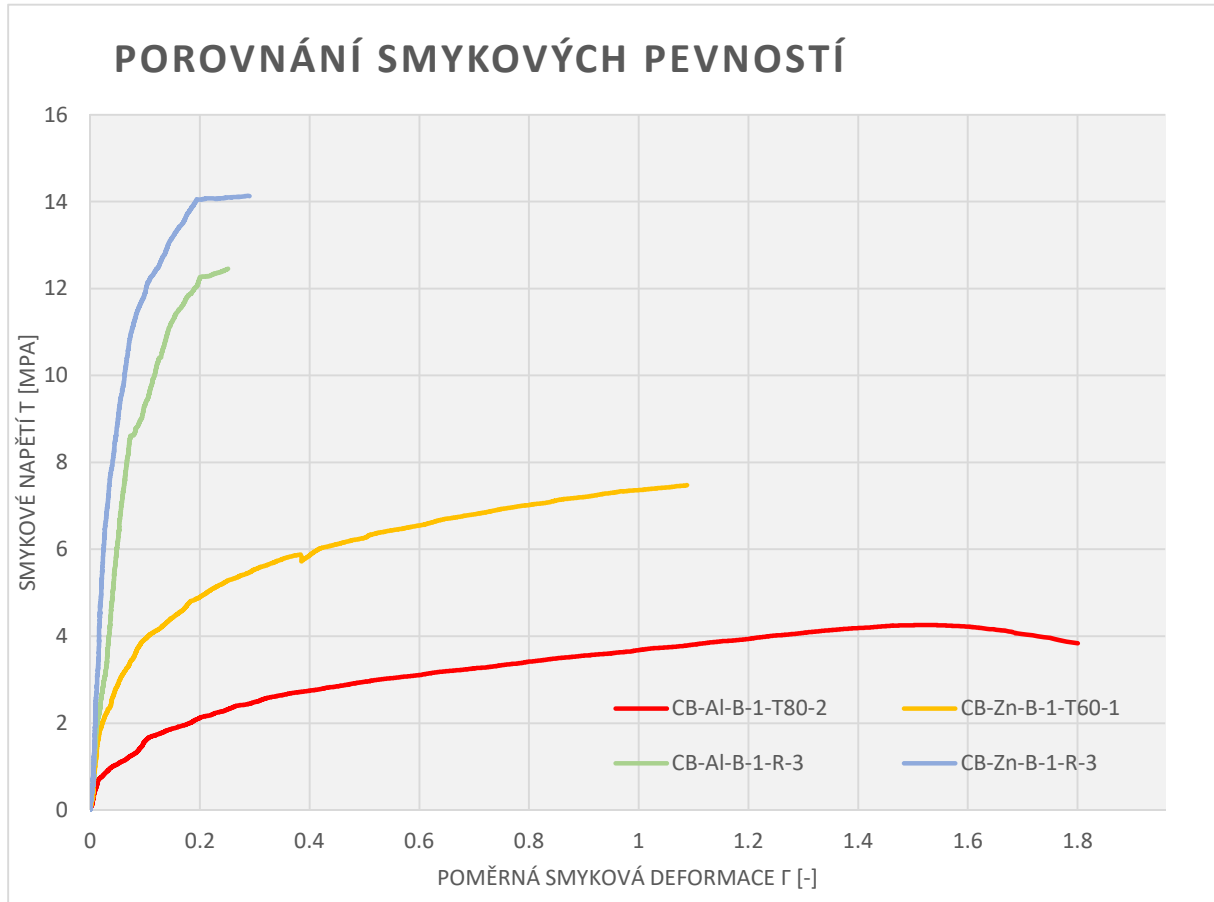
7.4. Zkoušky s lepidlem Crestabond M7-05 při 60 °C a 80 °C – první část

Měření referenčních vzorků s ocelovým i hliníkovým středovým plechem proběhlo za teploty 22 °C a relativní vlhkosti okolního vzduchu 41%.

Vzorky zkoušené za zvýšené teploty byly předeřhřaty v sušičce na požadovanou teplotu, aby se urychlil proces zkoušení. Postupně byly vzorky ze sušičky přemístěny do zkušebního stroje s připojenou zkušební pecí. Zde byly vzorky ještě určitou dobu temperovány, aby bylo zajištěno dosažení požadované teploty nejen na povrchu plechů, ale i v lepidle. Měřena byla teplota povrchu plechů termočlánekem připojeným do digitálního zařízení.

V průběhu zkoušení se občas vyskytl problém na jednom z potenciometrů, který přestal měřit posun částečně nebo úplně a některé výsledky tak musely být převzaty pouze z jednoho potenciometru, nebo úplně znehodnoceny.

Veškeré výsledky jsou shrnuty v následujících tab. 7.1 a 7.2, včetně způsobů porušení jednotlivých vzorků. V tabulkách se za přetvoření považuje smykové přetvoření. Graf na obr. 7.7 zobrazuje pokles smykové pevnosti v závislosti na teplotě a materiálu vzorku. Vzorky zobrazené na grafu odpovídají tělesu, které nejlépe vystihuje chování dané sady vzorků. Vizuální vyhodnocení porušení vzorků a možné nepřesnosti (odchyly) měření jsou popsány v jednotlivých kapitolách pro každou sadu vzorků zvlášť.



obr. 7.7: Graf porovnání smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro vybrané vzorky z jednotlivých zkušebních sad

tab. 7.1: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s hliníkovým středním plechem (sklo-hliník) za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou chybné hodnoty měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty

	MAX. SÍLA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ	MAX. PŘETVOŘENÍ 1	MAX. PŘETVOŘENÍ 2	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ	ZPŮSOB PORUŠENÍ	
	[kN]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
CB-Al-B-1-R-1	52.536	10.507	0.147	0.032	0.147	S	porušení skla, lepidlo malé protažení
CB-Al-B-1-R-2	54.504	10.901	17.206	0.314	0.314	S	porušení skla, lepidlo malé protažení
CB-Al-B-1-R-3	62.928	12.586	0.363	0.185	0.274	S	porušení skla, lepidlo malé protažení
CB-Al-B-1-R-4	47.592	9.518	0.782	14.122	0.782	S	chybné měření deformací
CB-Al-B-1-R-5	64.104	12.821	0.110	0.231	0.170	S	porušení skla, lepidlo malé protažení
PRŮMĚR	56.333	11.267	0.207	0.243	0.226		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	7.037	1.407	0.136	0.066	0.080		
CB-Al-B-1-T80-1	29.992	5.998	1.304	0.001	1.304	A-S	sklo od lepidla, sklo malé porušení
CB-Al-B-1-T80-2	21.28	4.256	1.511	1.516	1.513	A	sklo od lepidla čistě
CB-Al-B-1-T80-3	19.856	3.971	1.631	1.307	1.469	A-S	sklo od lepidla, sklo malé porušení
CB-Al-B-1-T80-4	22.616	4.523	1.622	0.951	1.434	A	sklo od lepidla čistě
CB-Al-B-1-T80-5	18.936	3.787	1.404	1.007	1.205	A	sklo od lepidla čistě
PRŮMĚR	22.536	4.507	1.490	1.195	1.385		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	4.397	0.879	0.141	0.265	0.127		

tab. 7.2: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s pozinkovaným středním plechem (sklo-ocel) za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou chybné hodnoty měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty

	MAX. SÍLA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ	MAX. PŘETVOŘENÍ 1	MAX. PŘETVOŘENÍ 2	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ	ZPŮSOB PORUŠENÍ	
	[kN]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
CB-Zn-B-1-R-1	63.360	12.672	0.896	1.682	1.289	S	drcení skla
CB-Zn-B-1-R-2	70.656	14.131	0.755	23.860	0.755	A-K-S	porušení skla, malá část adhezně
CB-Zn-B-1-R-3	71.088	14.218	0.429	0.215	0.322	A-K-S	porušení skla, více adhezně
CB-Zn-B-1-R-4	58.968	11.794	1.629	22.836	1.629	A-K-S	porušení skla, více adhezně
CB-Zn-B-1-R-5	44.832	8.966	0.514	0.082	0.298	A-K-S	porušení skla, více adhezně
PRŮMĚR	61.781	12.356	0.845	0.660	0.859		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	10.759	2.152	0.476	0.888	0.590		
CB-Zn-B-1-T60-1	38.072	7.6144	0.8753	1.7242	1.2998	A-K-S	ocel od lepidla, část lepidla kohezně
CB-Zn-B-1-T60-2	37.576	7.5152	1.2391	1.2980	1.2683	A-K	ocel od lepidla, část lepidla kohezně
CB-Zn-B-1-T60-3	38.424	7.6848	1.5317	1.7369	1.6343	A-K-S	ocel od lepidla, část lepidla kohezně
CB-Zn-B-1-T60-4	39.912	7.9824	0.9514	1.9167	1.4340	A-K	ocel od lepidla, část lepidla kohezně
CB-Zn-B-1-T60-5	42.696	8.5392	1.3840	1.4019	1.3930	A-K-S	ocel od lepidla, část lepidla kohezně
PRŮMĚR	39.336	7.867	1.196	1.615	1.406		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	2.071	0.414	0.280	0.257	0.144		

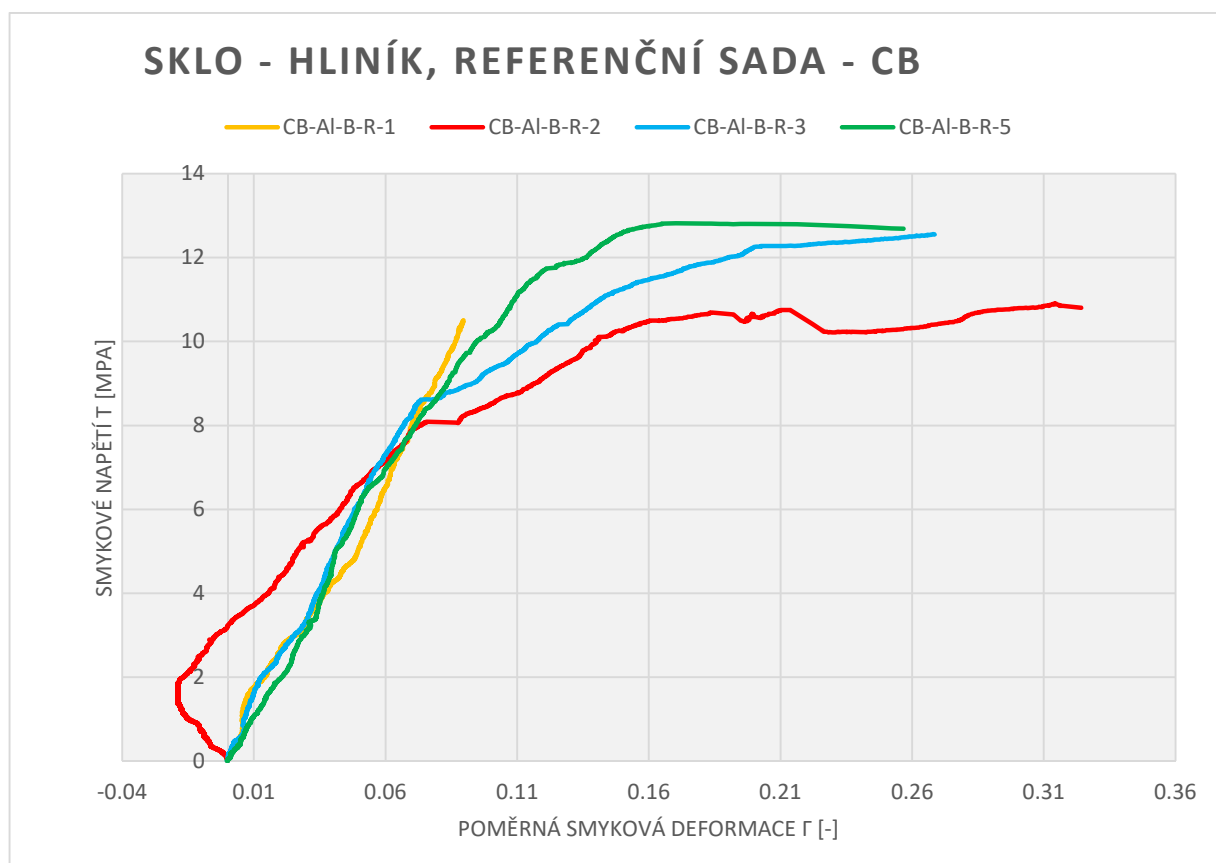
7.4.1. Sada referenčních vzorků sklo – hliník za teploty 22°C

Pro referenční sadu s hliníkovým středovým plechem bylo typické porušení skleněného substrátu. U všech vzorků bylo sklo rozdrveno na kousky. U lepidla nebylo dosaženo jeho maximální pevnosti a bylo tedy pevnější částí lepeného spoje.

Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro referenční sadu sklo - hliník činila **11,704 MPa**, při poměrném přetvoření **0,212**. Poměrné přetvoření vzorků bylo pro tuto sadu velmi malé.

Při měření vzorku č. 1 byl nefunkční potenciometr 2, který musel být pro další měření nahrazen. U vzorku č. 2 odpadnul úhelníček před koncem měření (na straně potenciometru 1) a tyto výsledky tak byly znehodnoceny. Při měření vzorku č. 4 bylo měření chybné z obou potenciometrů. Všechny chybné hodnoty nebyly zahrnuty do celkových výsledků.

Na následující grafu (obr. 7.8) je na počátku měření vzorku č. 2 záporná hodnota smykové deformace. Vzhledem k porušení potenciometru na jedné straně byla poměrná smykové deformace vypočtena pouze z měření na druhé straně. Měření mohlo být na začátku zkresleno natočením vzorku ve stroji, nicméně měření proběhlo bezchybně.



obr. 7.8: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků sklo – hliník, vzorek č. 4 nebyl zahrnut do průměru celé sady z důvodu chybného měření deformací



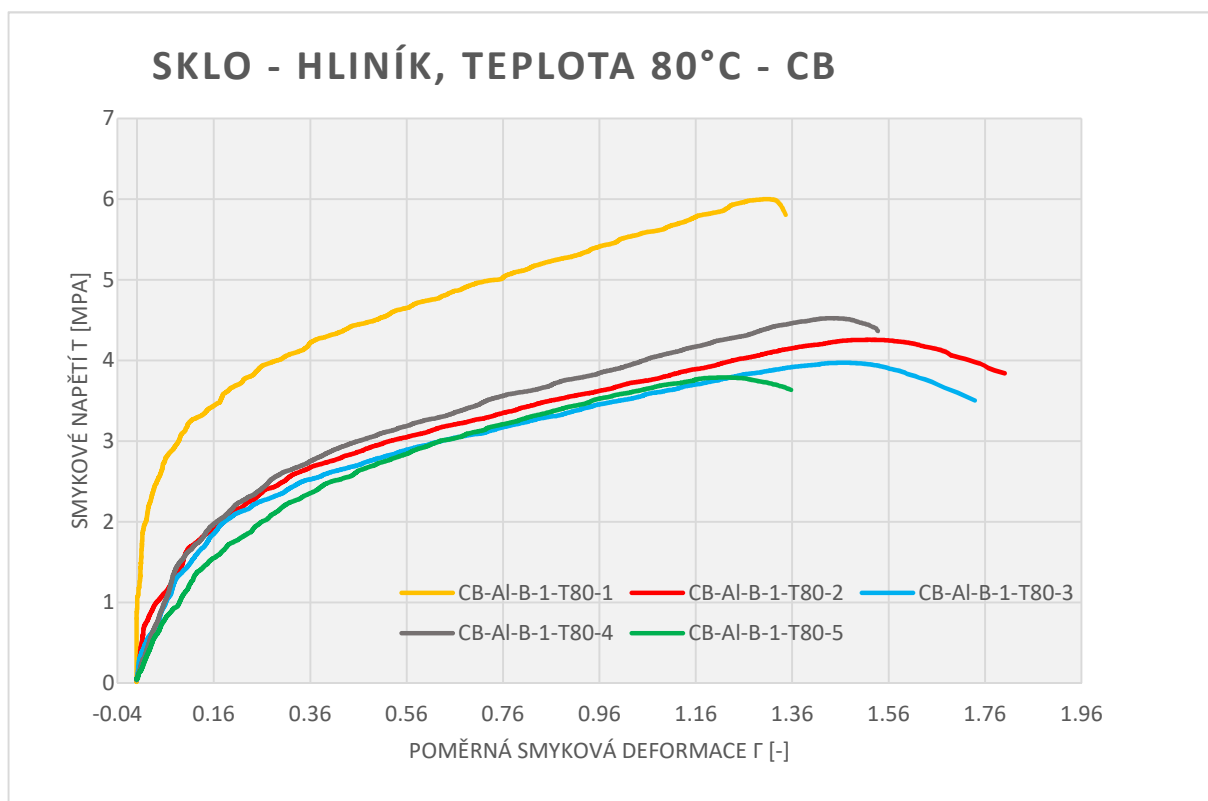
obr. 7.9: Porušení substrátu u vzorku č. 3 referenční sady sklo - hliník (vlevo) a u vzorku č. 1 (vpravo) – zde je vidět nalepený L úhelničiek s potenciometrem

7.4.2. Sada vzorků sklo – hliník za teploty 80°C

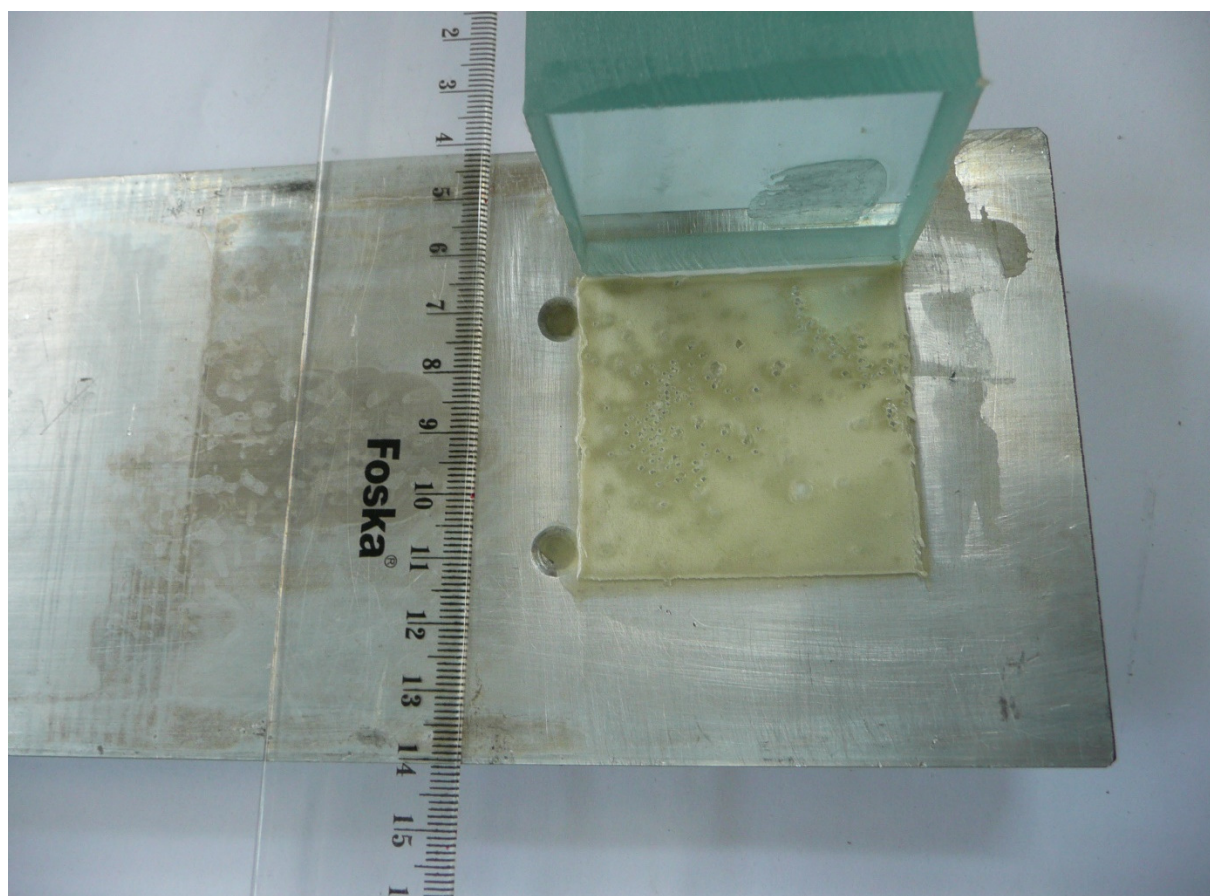
Pro sadu vzorků s hliníkovým středovým plechem, zkoušenou za zvýšené teploty 80°C, byl rozhodující adhezní způsob porušení. U všech vzorků bylo možné pozorovat téměř čisté oddělení skleněných substrátů od vrstvy lepidla, která se pouze mírně protáhla a zůstala jinak neporušená. Schopnost adheze lepidla Crestabond k povrchu skla byla za teploty 80°C značně snížena. U vzorků č. 1 a č. 3 navíc došlo k mírnému popraskání skleněných dílců, toto porušení však bylo pouze minoritní.

Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro sadu sklo - hliník za zvýšené teploty činila **4,507 MPa**, při poměrném přetvoření **1,385**. Z výsledků bylo možné pozorovat pokles průměrné smykové pevnosti na 38,5% referenční hodnoty, při zvýšení poměrného přetvoření na 653% referenční hodnoty. Deformace vzorků za zvýšené teploty byla tedy přibližně 6,5x větší, při dosažení přibližně 0,3x smykové pevnosti.

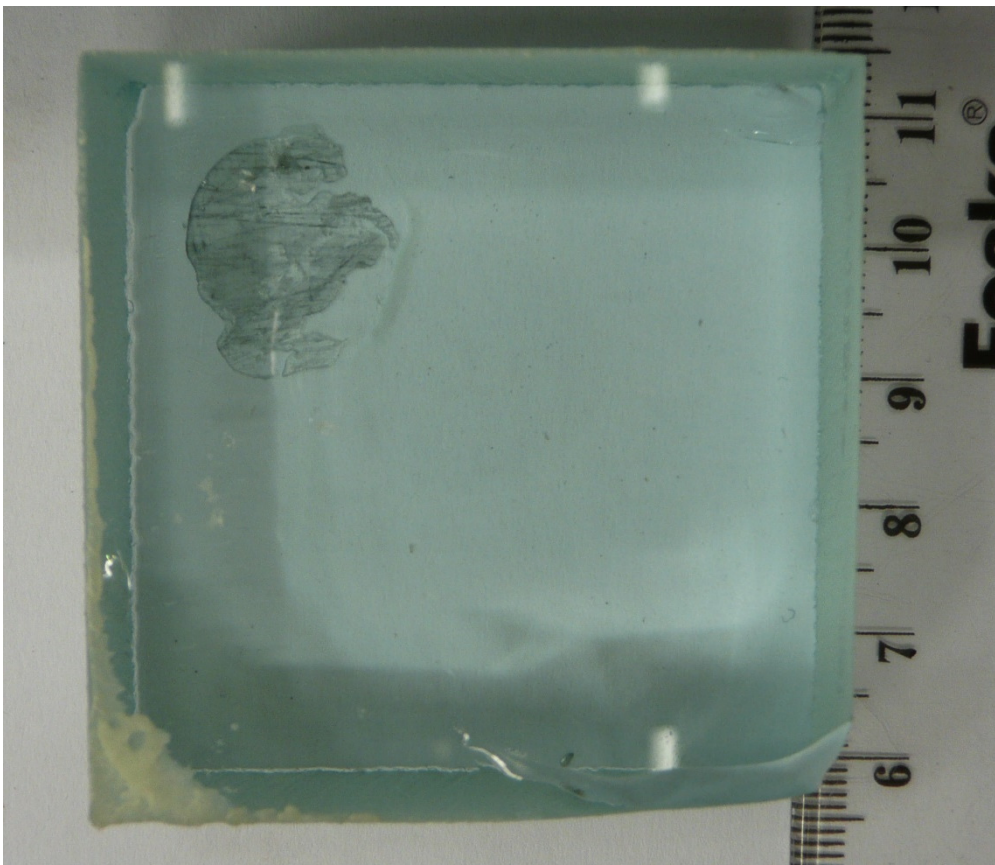
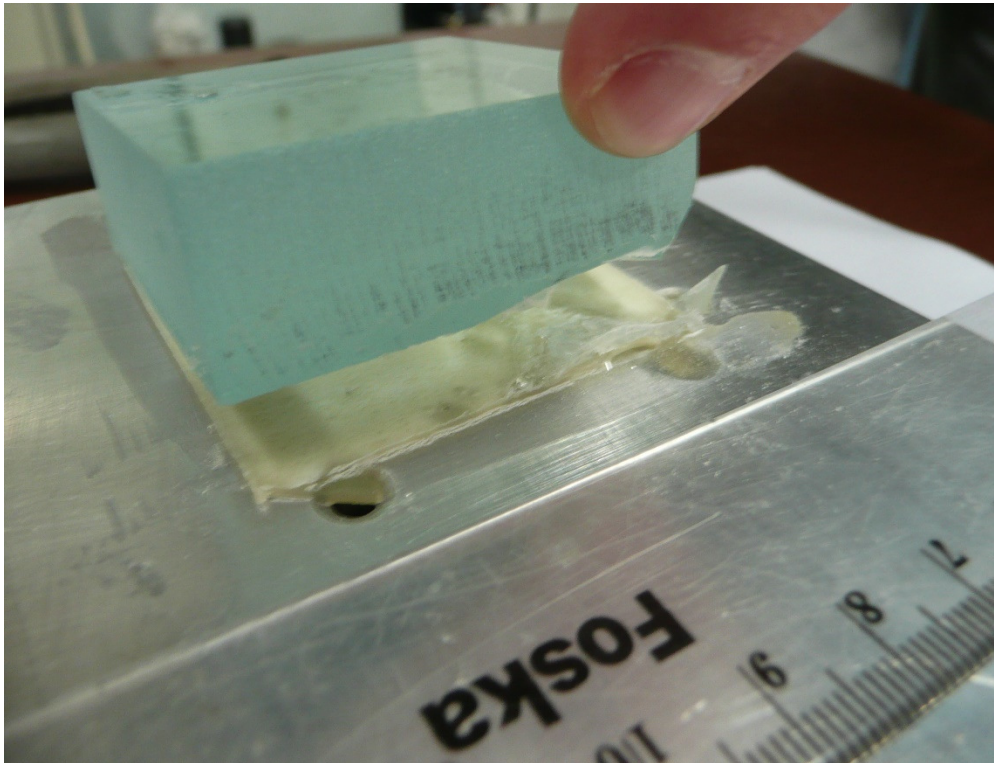
Chybné měření deformací nastalo pouze u vzorku č. 1, do celkových výsledků není zahrnuta pouze hodnota přetvoření z potenciometru 2.



obr. 7.10: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků sklo – hliník za teploty 80°C



obr. 7.11: Čistě adhezní porušení u vzorku č. 2 sady sklo – hliník za zvýšené teploty

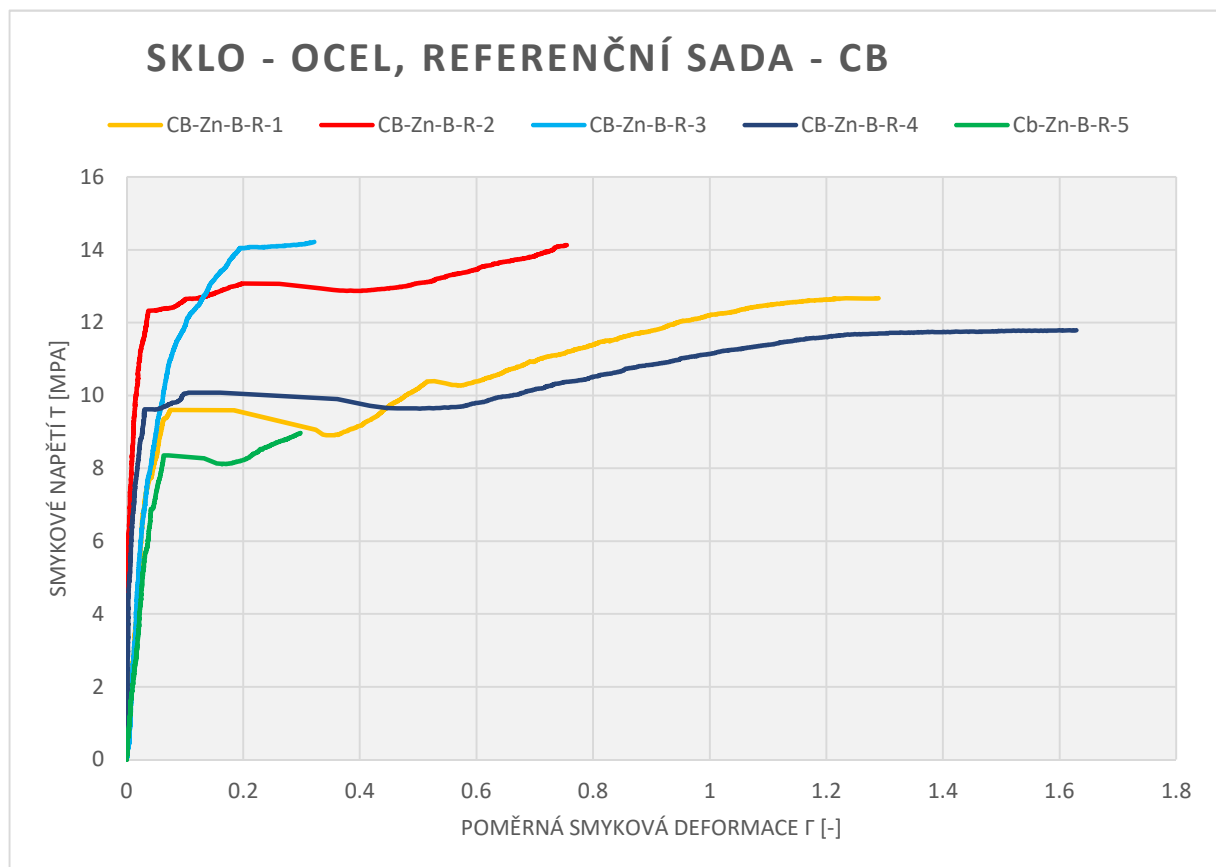


obr. 7.12: Adhezní porušení s drobným porušením skleněného substrátu u vzorku č. 1 (nahore) a u vzorku č. 3 (dole) sady sklo – hliník za zvýšené teploty, u vzorku č. 3 je možné pozorovat také kohezní porušení na velmi malé ploše v levém dolním rohu, toto je nevýznamné

7.4.3. Sada referenčních vzorků sklo – ocel za teploty 22°C

U referenční sady s ocelovým středovým plechem bylo možné pozorovat podobné chování, jako u referenční sady s plechem hliníkovým (kap. 7.4.1). U všech vzorků bylo opět převažující porušení skleněného substrátu, a tedy bylo dosaženo pevnosti skla, nikoliv lepidla. U vzorků s pozinkovaným plechem došlo také k částečně adheznímu porušení lepidla od vrstvy plechu a to na menší než poloviční části spoje. Adhezně porušené části vzorků měly viditelnou stopu zinku ve vrstvě odděleného lepidla. Velmi malá část lepidla byla porušena kohezně, a to pouze na rozmezí adhezně oddělené části lepidla, toto porušení je v porovnání s ostatními způsoby nevýznamné.

Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro referenční sadu sklo - ocel činila **12,356 MPa**, při poměrném přetvoření **0,859**.



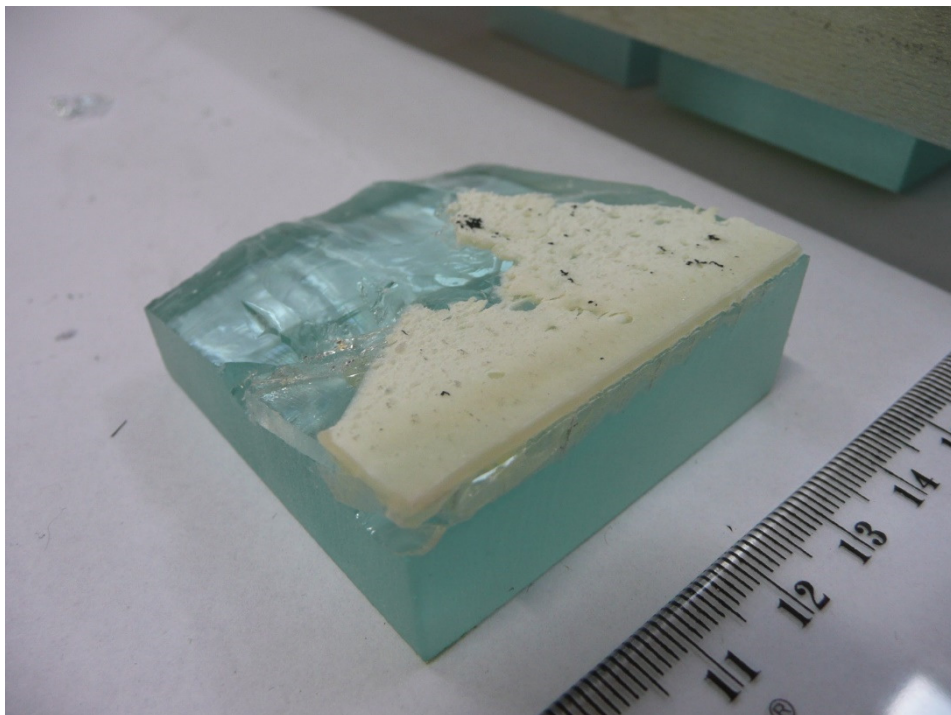
obr. 7.13: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků sklo – ocel

V průběhu měření deformací došlo pravděpodobně k vzniku náhodných chyb, jako posunutí pomocných úhelníků nebo nechtěné vybočení potenciometrů, které ovlivnily výsledky měření. Vzorky č. 3 a 5 z této sady vykazovaly hodnoty poměrné přetvoření $\sim 0,3$. Přetvoření u vzorků č. 1 a 4 dosáhly hodnoty větší než 1,2. Pro vzorek č. 2 dosáhlo přetvoření hodnoty 0,76. Z grafu (obr. 7.13) je patrné, že výkyvy smykových deformací jsou pro tuto sadu značné a nelze tedy považovat všechny výsledky za průkazné.

Potenciometr 2 chybně měřil posuny u vzorků č. 2 a č. 4, to bylo způsobeno předčasným odlomením pomocných úhelníků. Tyto dvě chybné hodnoty nejsou zahrnuty do výsledků měření.



obr. 7.14: Viditelná plocha adhezního porušení od pozinkovaného povrchu a kohezní porušení na tenké hranici, kde se lepidlo přetrhlo – vzorek č. 3 z referenční sady sklo – ocel

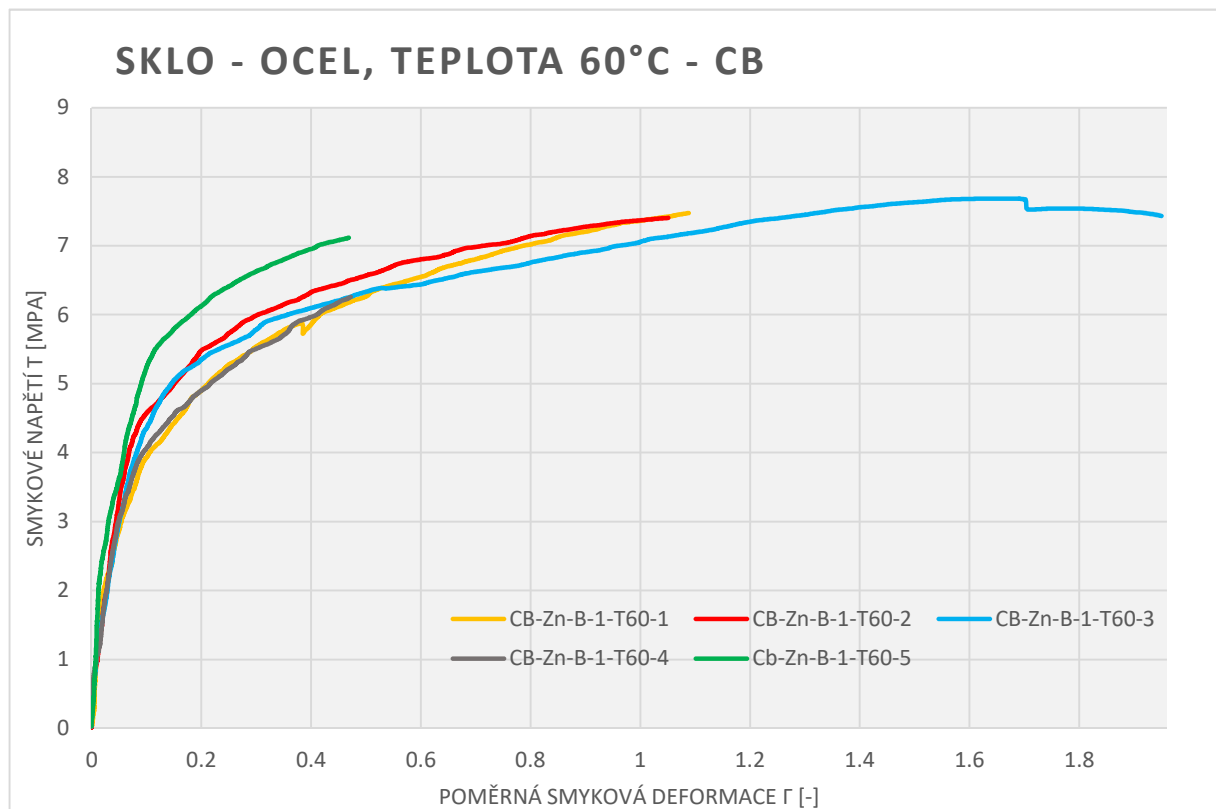


obr. 7.15: Adhezní porušení mezi vrstvou lepidla a středového pozinkovaného plechu, viditelné ulomení skla – vzorek č. 3 z referenční sady sklo – ocel

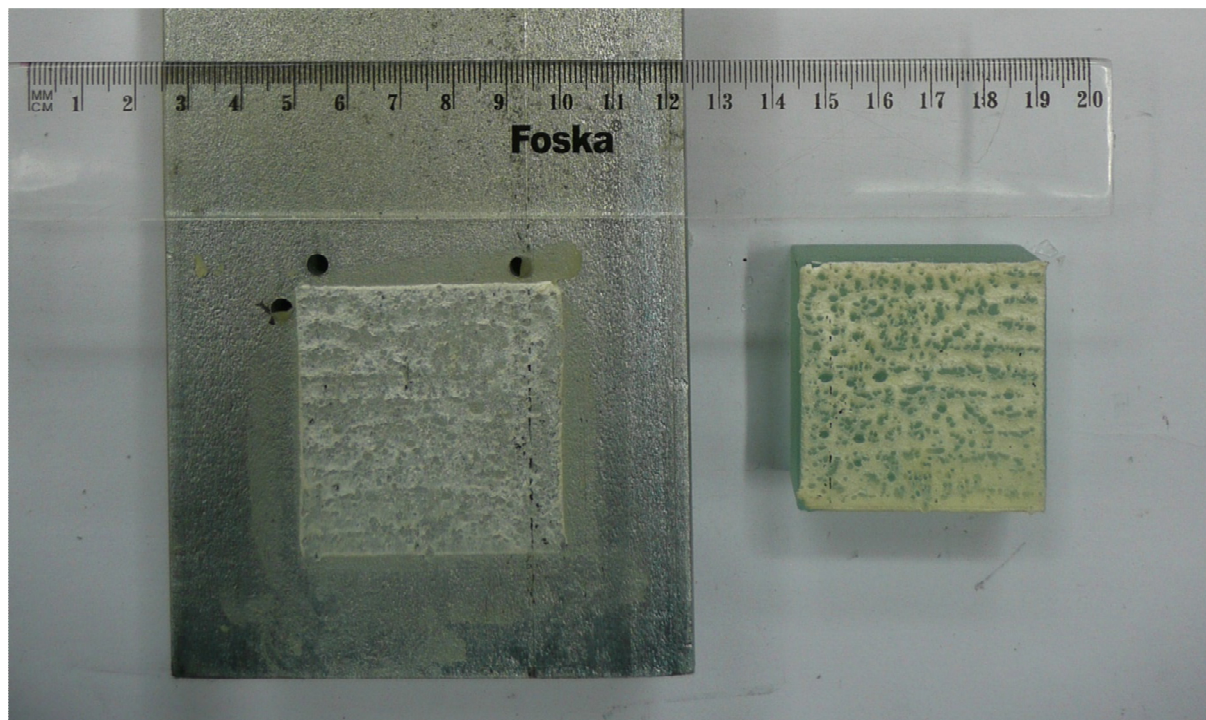
7.4.4. Sada vzorků sklo – ocel za teploty 60 °C

Pro vzorky s pozinkovaným středovým plechem, ze sady zkoušené za zvýšené teploty 60 °C, byl rozhodující způsob porušení adhezně kohezní. U všech vzorků se vrstva lepidla potrhala a adhezně se oddělila od pozinkovaného plechu. Vzorek č. 2 byl porušen převážně kohezním způsobem. Porušení skleněného substrátu se vyskytlo pouze u vzorků č. 1, č. 3 a č. 5, tato porušení však byla velmi drobná a tedy minoritní. Schopnost adheze mezi vrstvou lepidla a skla je při 60 °C lepší, než při 80 °C, protože se vzorky neporušili na styku těchto dvou ploch jako v předchozí sadě zkoušené za 80 °C.

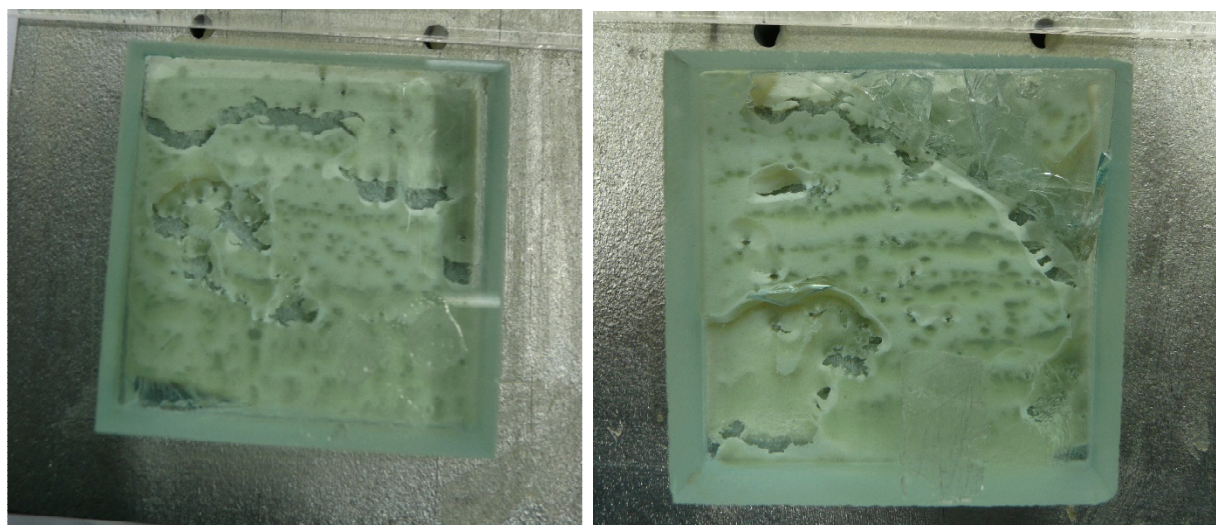
Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro sadu sklo - ocel za zvýšené teploty činila **7,867 MPa**, při poměrném přetvoření **1,406**. V porovnání se sadou s hliníkovým plechem, zkoušenou za 80 °C, bylo průměrné přetvoření vrstvy lepidla přibližně stejné, přičemž dosažená průměrná smyková pevnost byla větší o 3,3 MPa. U sady sklo – hliník za 80 °C došlo k adheznímu porušení mezi vrstvou skla a lepidla, při průměrné smykové pevnosti 4,507 MPa, zatímco u sady sklo – ocel za 60 °C došlo k převážně koheznímu porušení a nárůstu průměrné smykové pevnosti na 7,867 MPa.



obr. 7.16: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků sklo – ocel za teploty 60 °C



obr. 7.17: Adhezně kohezní porušení uvnitř vrstvy lepidla – vzorek č. 2 ze sady sklo – ocel za teploty 60°C



obr. 7.18: Adhezně kohezní porušení, viditelné potrhání vrstvy lepidla – vzorek č. 4 (vlevo) a vzorek č. 3 (vpravo) ze sady sklo – ocel za teploty 60°C

7.4.5. Vyhodnocení první části s lepidlem Crestabond® M7-05

Samotný průběh zkoušek byl uspokojivý, bylo dosaženo průkazných výsledků. Výrazně odchylné hodnoty měření nebyly zařazeny mezi výsledky. Možným slabým místem vzorků byla skutečná tloušťka lepidla, která byla průměrně u všech vzorků menší než 1 mm. Tato nepřesnost vznikla při technologickém postupu výroby vzorků a mohla mít vliv na celkovou únosnost spoje.

tab. 7.3: Průměrné výsledky měření z první části zkoušek

	MAX. SÍLA [kN]	MAX. SMYKOVÉ NAPĚTÍ [MPa]	MAX. PŘETVOŘENÍ [-]
SKLO – HLINÍK 22°C	56,33	11,28	0,226
SKLO – HLINÍK 80°C	22,54	4,51	1,385
SKLO – OCEL 22°C	61,78	12,36	0,859
SKLO – OCEL 60 °C	39,34	7,87	1,406

Pro vybrané metylmetakrylátové lepidlo Scott Bader Crestabond ® M7-05 bylo dosaženo předpokládaných výsledků dle stanovených cílů. Výrobce udávaná hodnota smykové pevnosti 17 – 22 MPa pro přeplátovaný spoj s hliníkovým substrátem (v souladu s ISO 4587:2003) nebyla dosažena. U vzorků zkoušených za běžné teploty došlo k dosažení pevnosti skla, a tedy porušení substrátu. U vzorků zatížených teplotou docházelo především k adheznímu a adhezně koheznímu porušení.

Lepidlo má dle technického listu stanovenou provozní teplotu od -40 °C do +100 °C. U vzorků s ocelovým středovým plechem, zatížených teplotou 60°C, klesla smyková pevnost průměrně na 63,7% pevnosti za běžné teploty. Vzorky s hliníkovým středovým plechem, zkoušené za teploty 80 °C, dosáhly průměrné pevnosti pouze 40% pevnosti referenční, u těchto vzorků však nebylo dosaženo pevnosti lepidla (kohezního porušení). Při adhezním porušení spoje za teploty 80 °C docházelo k čistému odlepení skleněného substrátu od vrstvy lepidla. Při teplotě 60 °C docházelo k adhezně koheznímu porušení mezi oběma substráty. Materiál středového plechu neovlivnil celkovou únosnost vzorků v žádné sadě. Výsledky značí klesající tendenci celkové únosnosti spoje při vzrůstající teplotě, a také poukazují na nedostatečné adhezní síly mezi lepidlem a sklem při teplotách 60 – 80 °C.

Poměrné protažení vrstvy lepidla dosahovalo pro vzorky za běžné teploty velmi malých hodnot. Lepidlo se chovalo jako tuhé. Za zvýšených teplot se poměrné protažení při přetržení vzorku dle očekávání výrazně zvýšilo, na 653% referenční hodnoty pro vzorky za teploty 80 °C a na 164% pro vzorky za teploty 60 °C.

Z hlediska celkové termické odolnosti je toto lepidlo nevhodné pro použití ve spojích krátkodobě namáhaných smykem a teplotou vyšší než 60 °C, a to z důvodu malé adheze k povrchu skla. V tomto případě se bohužel nedá hovořit ani o počáteční fázi požáru. Vzorky byly v průběhu zkoušek zatěžovány relativně vysokou rychlostí 1 mm/min, nicméně v rámci stanovených cílů nebylo zkoumání dlouhodobých vlivů předmětem práce. Pro aplikace do prostor s požárním rizikem není tento druh lepidla vhodný.

Lepidlo je jednoduše aplikovatelné a je použitelné pro širokou škálu materiálů. Za pokojové teploty je lepidlo schopné přenést zatížení vyšší než >12 MPa při velmi malé poměrné deformaci. Lepidlo je velmi pevné a tuhé, z toho důvodu by bylo výhodnější jej použít v bodovém spoji.

7.5. Zkoušky s lepidlem Permabond ES5504 při 200 °C a 230 °C – druhá část

Měření všech vzorků proběhlo za shodné okolní teploty 20 °C a relativní vlhkosti okolního vzduchu 44%.

Vzorky za zvýšené teploty se před samotným zkoušením vždy nechaly temperovat v peci na požadovaných 200 °C, respektive 230 °C. Na počátku zkušebního dne se všechny připravené vzorky uložily do sušičky, kde byly zahřáty na požadovanou teplotu. Poté se postupně ukládaly do stroje se zkušební pecí tak, aby se urychlil proces testování. Poslední vzorky na konci dne byly vystaveny teplotám v předehřívací peci delší dobu a mohlo tak dojít ke zkreslení výsledků vlivem dodatečného dotvrzení vzorků. Teplota povrchu vzorků byla v průběhu zkoušek měřena termočlánkem připojeným do digitálního zařízení a pohybovala se v rozmezí ± 2 °C od požadované hodnoty.

V případě měření za teploty 200 °C a 230 °C nebylo v laboratoři možné vytvořit podmínky pro připojení potenciometrů k sestavě a měřit tak hodnoty přetvoření. Původně bylo navrženo použít měření z posunu příčnicku zkušebního stroje, odečíst prokluz všech částí sestavy od referenční sady vzorků a získat přepočet skutečného přetvoření vrstvy lepidla. Vzhledem k neprůkazným výsledkům (viz dále) byla nakonec hodnocena pouze přetvoření pro referenční sadu získaná z potenciometrů, a přepočtené hodnoty posunu příčnicku byly uvedeny pouze jako orientační, nikoliv skutečné.

Zjednodušený postup určení přetvoření vrstvy lepidla spočíval ve stanovení hodnoty posunu příčnicku [mm] pro všechny vzorky. K vzorkům z referenční sady pak byly doplněny skutečné posuny měřené pomocí potenciometrů. Hodnoty posunů z potenciometrů a příčnicku byly vynásobeny a zprůměrovány. Následně byly tímto průměrem násobeny hodnoty posunu příčnicku pro sady vzorků zkoušené za 200 a 230 °C. Tímto postup však došlo k velkému zkreslení výsledků, navíc hodnoty posunu příčnicku byly velmi různorodé a nesmyslné. Poměrné smykové deformace pro vzorky zkoušené za 200 a 230 °C jsou v předložené práci uvedeny pouze orientačně, nikoliv jako výsledky!

tab. 7.5: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s pozinkovaným středním plechem (ocel-ocel), za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou neprůkazné hodnoty z měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty

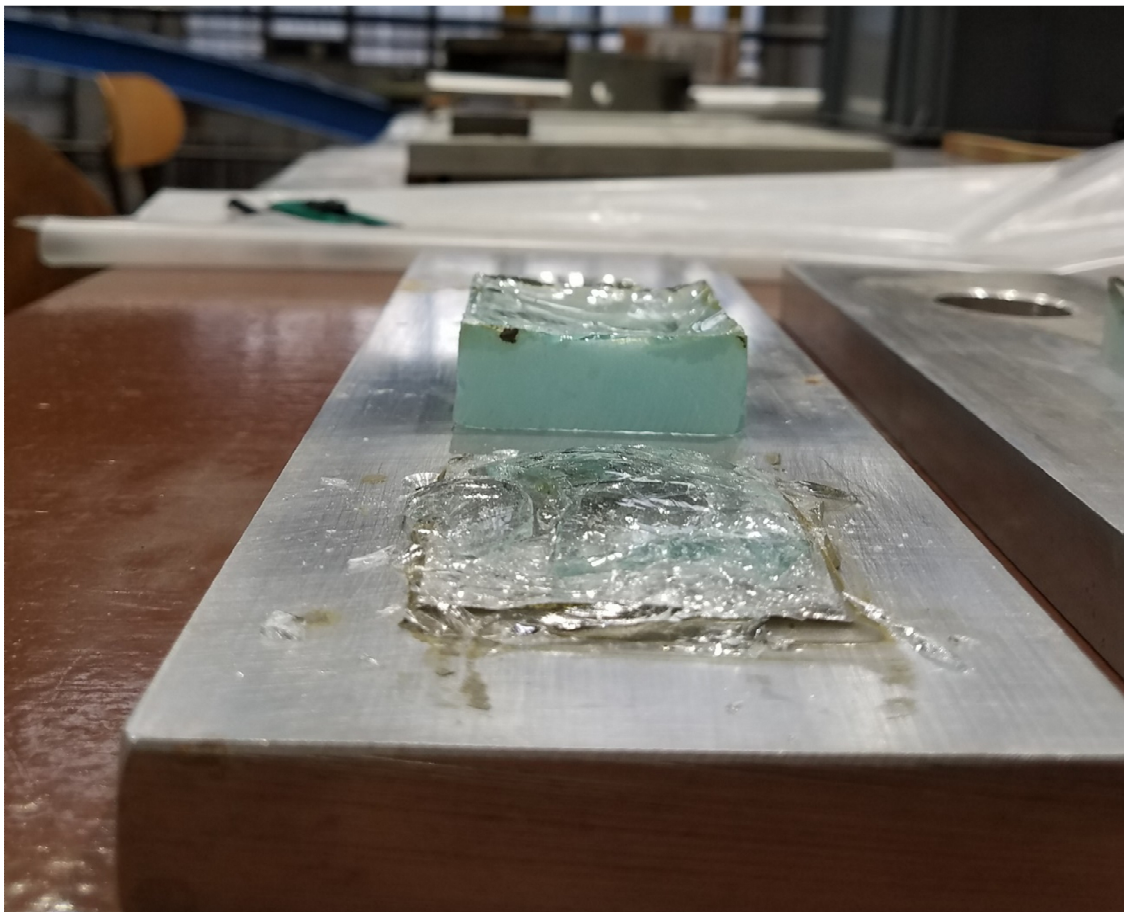
	MAX. SÍLA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ	MAX. PŘETVOŘENÍ 1	MAX. PŘETVOŘENÍ 2	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ	ZPŮSOB PORUŠENÍ	
	[kN]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
PB-Zn-B-1-R-1	77.651	15.530	0.016	0.042	0.029	A	adhezně od pozink. Povrchu
PB-Zn-B-1-R-2	113.707	22.739	0.095	0.013	0.054	A	adhezně od pozink. Povrchu
PB-Zn-B-1-R-3	76.263	15.253	0.010	0.110	0.060	A	adhezně od pozink. Povrchu
PB-Zn-B-1-R-4	108.487	21.697	0.025	0.068	0.047	A	adhezně od pozink. Povrchu
PRŮMĚR	94.027	18.805	0.036	0.058	0.047		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	19.834	3.966	0.040	0.041	0.014		
PB-Zn-B-1-T200-1	99.0623	19.812	-	-	0.046	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T200-2	81.87112	16.374	-	-	0.041	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T200-3	53.70326	10.741	-	-	0.028	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T200-4	68.798	13.760	-	-	0.059	A	adhezně od obou povrchů
PRŮMĚR	75.859	15.172			0.043		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	19.281	3.856			0.013		
PB-Zn-B-1-T230-1	38.758	7.752	-	-	0.082	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T230-2	25.021	5.004	-	-	0.142	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T230-3	18.456	3.691	-	-	0.129	A	adhezně od obou povrchů
PB-Zn-B-1-T230-4	11.628	2.326	-	-	0.196	A	adhezně od obou povrchů
PRŮMĚR	23.466	4.693			0.137		
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	11.568	2.314			0.047		

7.5.1. Sada vzorků sklo – ocel

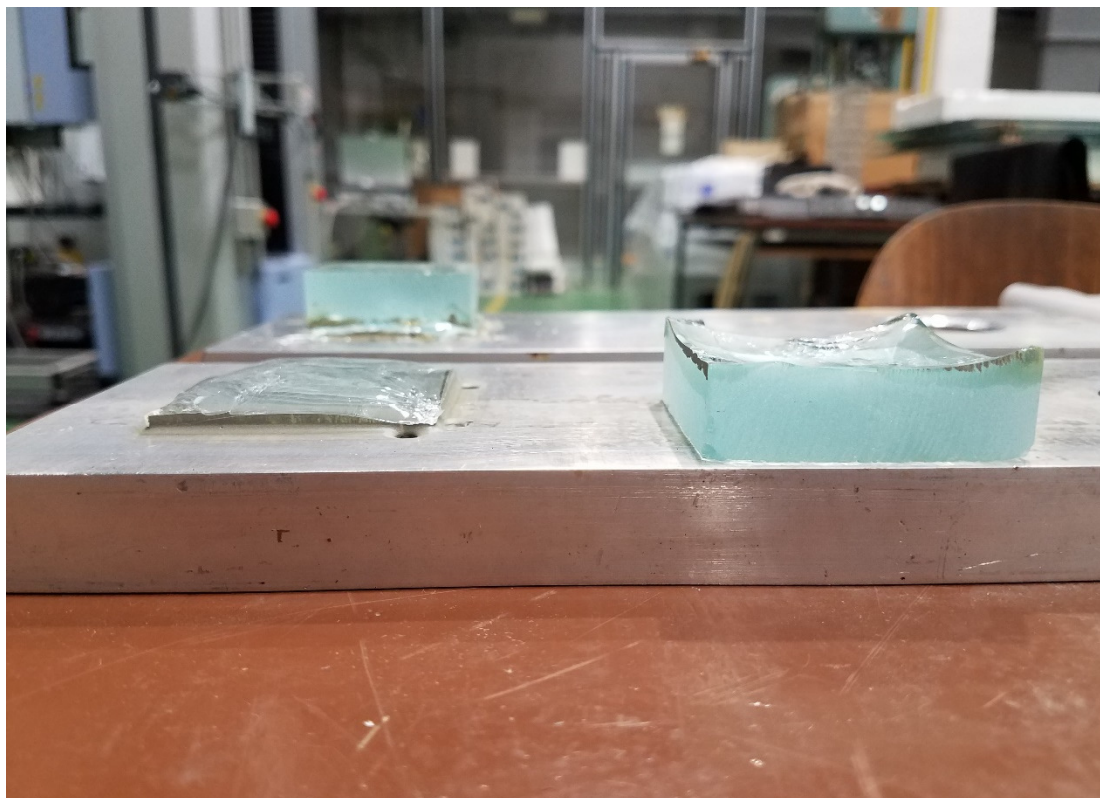
Návrh zkušebních vzorků pro výzkum lepených spojů za zvýšených teplot obsahoval původně zkušební vzorky s kovovým středovým a skleněným bočním substrátem, tedy vzorky totožné jako v první části zkoušek, pouze spojené jiným lepidlem s lepší termickou odolností.

Vybrané lepidlo Permabond ES5504 (viz 7.2.2) má výrobcem předepsanou dobu vytvrzení 1 hodinu při teplotě 150 °C a poté 1 hodinu při 200 °C. Při vytvrzování vzorků se skleněným bočním dílem v peci však došlo k destrukci skla u všech vzorků. Prvních 6 bylo vytaženo bezprostředně po dovršení dvou hodin v peci, druhých 6 bylo po dovršení zahřívání ve vypnuté peci ponecháno dalších 24 hodin, aby bylo ochlazování vzorků co nejvíce postupné a omezil se tak vznik přídatných napětí, způsobený vysokým teplotním gradientem při otevření pece.

Postupné ochlazení nemělo na vzorky žádný pozitivní vliv. Všechny 12 vzorků se skleněným substrátem bylo porušeno stejným způsobem. Z důvodu velké tuhosti lepidla došlo pravděpodobně při zahřívání vzorků ke vzniku napětí, přesahující pevnost skla v tahu (přibližně 30 MPa) a došlo tak k jeho prasknutí.



obr. 7.19: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, viditelný je zde pravidelný klenbovitý tvar typický pro všechny takto porušené vzorky



obr. 7.20: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, viditelný je zde pravidelný klenbovitý tvar typický pro všechny takto porušené vzorky



obr. 7.21: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, porušení je totožné pro vzorky ochlazované rychleji (vlevo) a pozvolna (vpravo)

Náhradním řešením bylo použití ocelových bočních dílců namísto skleněných. Boční dílce použité pro zkušební části v druhé části byly rozměrově stejné jako skleněné dílce v části první, jediný rozdíl byl tloušťce dílců, která byla snížena z původních 19 na 15 mm. Postup výroby vzorků byl stejný jako v první části zkoušek, viz kap. 7.1.

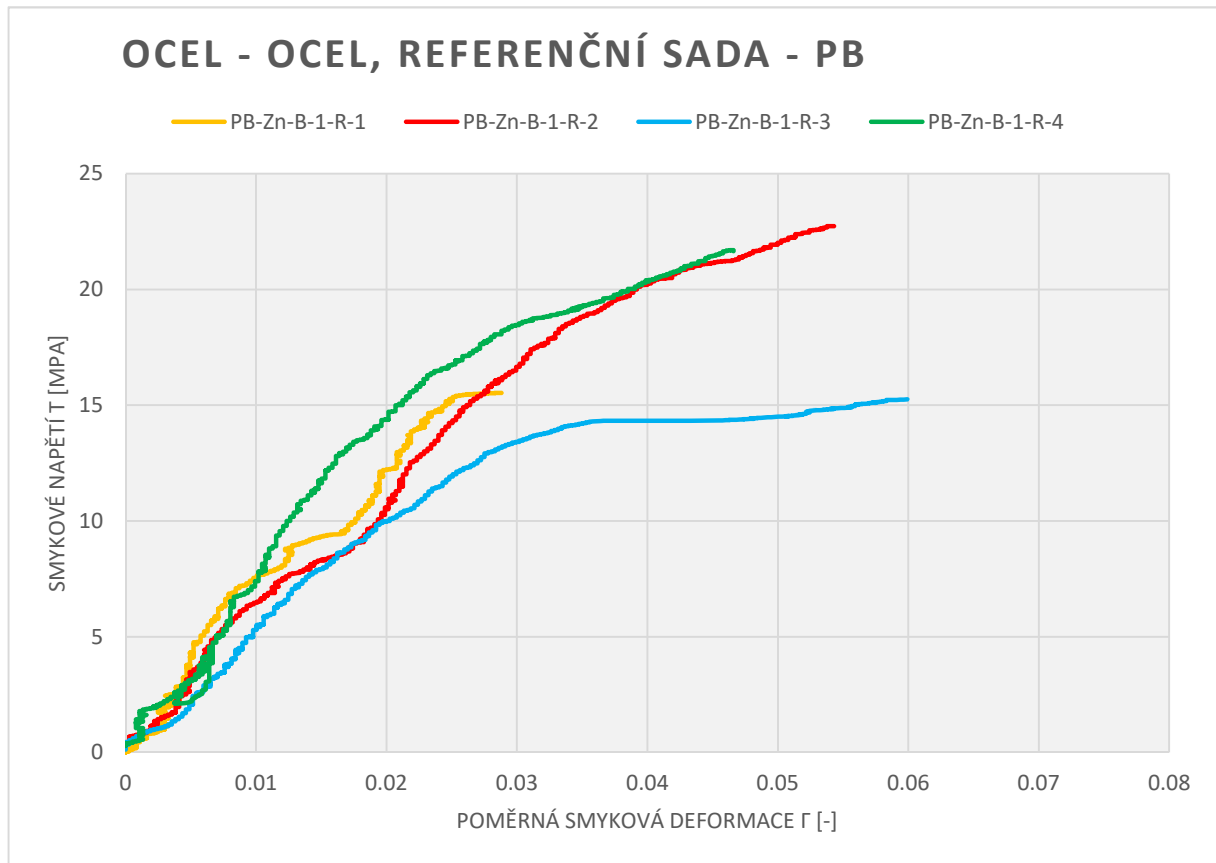


obr. 7.22: Náhradní řešení, nalepený vzorek s ocelovým středovým plechem a ocelovým bočním dílcem

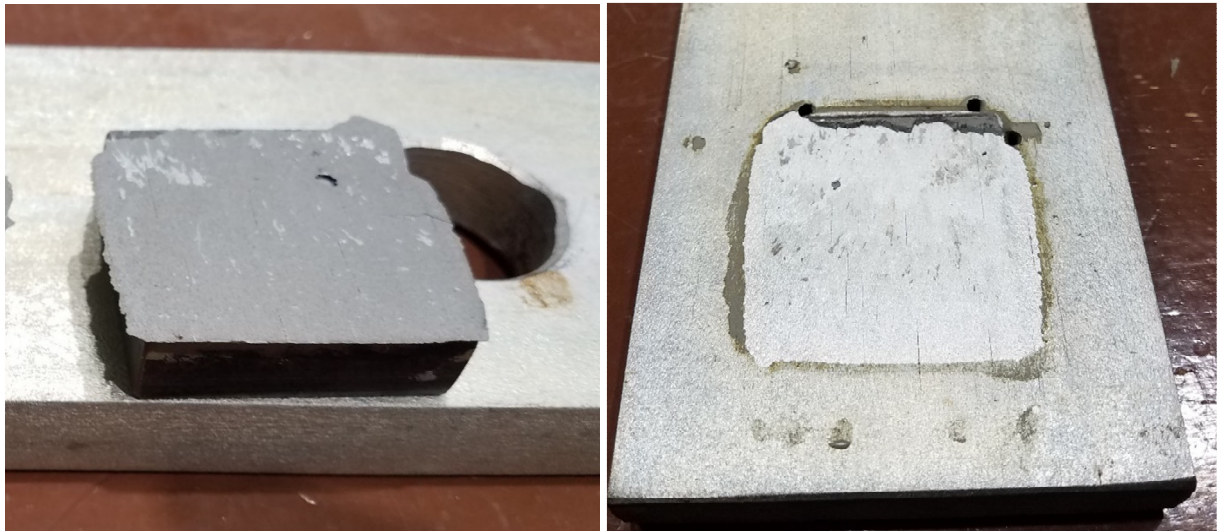
7.5.2. Referenční sada vzorků ocel – ocel za teploty 20°C

Pro referenční sadu s lepidlem Permabond, zkoušenou za běžné teploty, bylo typické adhezní porušení. Všechny vzorky v sadě byly porušeny stejným způsobem. Dominantní část lepeného spoje se adhezně oddělila od pozinkované vrstvy středového plechu, velmi malá část se oddělila od povrchu bočního dílce z konstrukční oceli. U některých vzorků byly při vizuálním vyhodnocení viditelné stopy zinku oddělené společně s lepidlem. Adheze zinkové vrstvy k plechu byla horší, nicméně tato skutečnost nikterak neovlivnila chování lepidla, ani únosnost spoje.

Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro referenční sadu ocel – ocel činila **18,805 MPa** při poměrném přetvoření **0,047**. Bylo dosaženo poměrně velké směrodatné odchylky při měření smykového napětí, a to 3,97 MPa. Poměrné přetvoření vzorků bylo velmi malé, lepidlo Permabond bylo dle očekávání tužší, než lepidlo Crestabond. U referenční sady s lepidlem Crestabond docházelo k destrukci skleněných substrátů, tudíž nelze srovnávat maximální smykové napětí ve spoji, jelikož nebylo dosaženo pevnosti lepidla. Všechny výsledky měření byly průkazné.



obr. 7.23: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků ocel - ocel



obr. 7.24: Téměř čisté adhezní porušení spoje, vlevo viditelné stopy zinku ve vrstvě lepidla – vzorek č. 1 z referenční sady ocel - ocel

7.5.3. Sada vzorků ocel – ocel za teploty 200°C

Pro všechny vzorky zkoušené za teploty 200°C bylo rozhodující adhezní porušení, stejně jako u vzorků z referenční sady za běžné teploty. Výrobce udávaná pevnost lepidla je při 200°C přibližně stejná, jako za běžné teploty. Na rozdíl od referenční sady bylo pro zkoušené vzorky typické adhezní porušení jak od vrstvy zinku, tak od konstrukční oceli v poměru cca 50:50. Za zvýšené teploty se adheze k povrchům snížila natolik, že zinková vrstva nebyla z povrchu stržena.

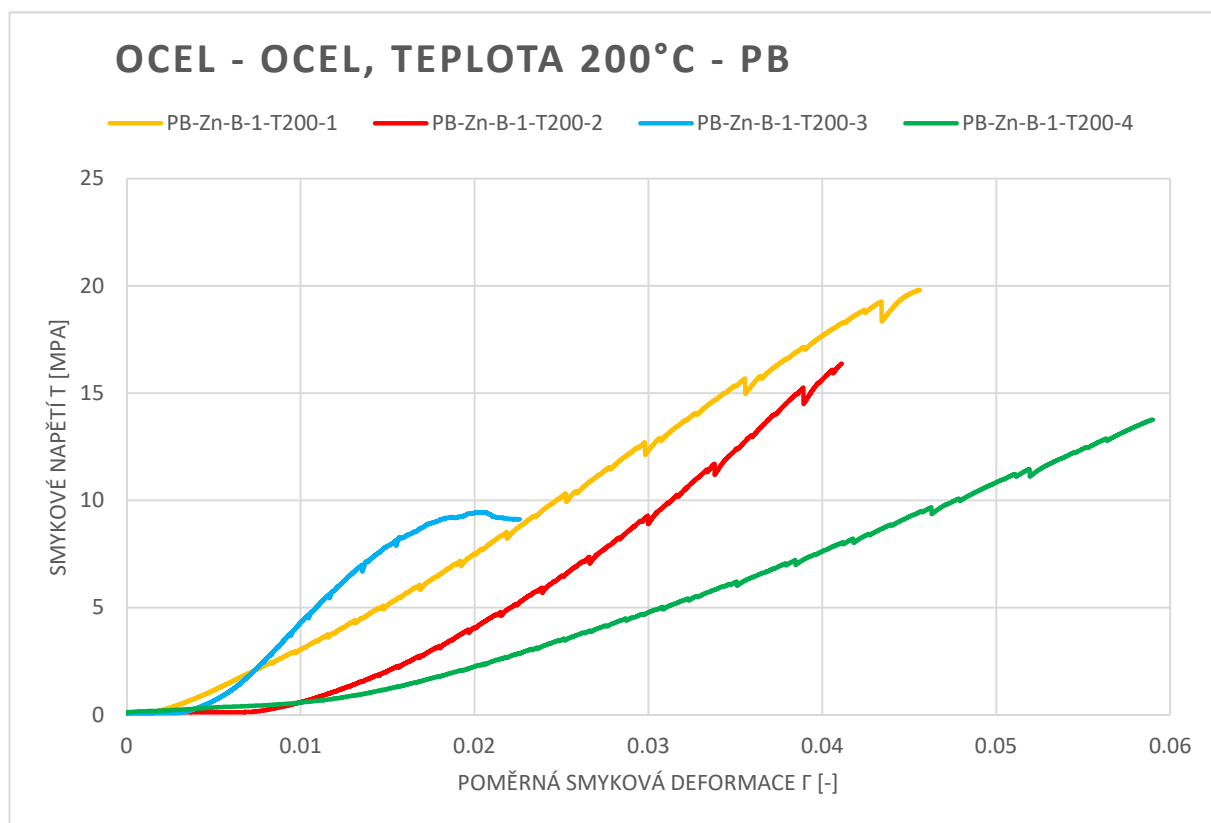
Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro sadu ocel – ocel za teploty 200°C činila **15,172 MPa**. Viditelná je tedy nejen snížená adheze lepidla, ale také mírný pokles celkové únosnosti spoje oproti referenční sadě (při stejných směrodatných odchylkách). Směrodatná odchylka i této sady se však pohybovala okolo 3,9 MPa, což poukazuje na velké rozdíly mezi výsledky jednotlivých měření.

V úvodu kapitoly 7.5 je popsána možná příčina nepřesnosti měření ve vztahu k přehřívání vzorků v peci, kdy u vzorků přehříváných před zkouškou déle mohlo dojít k dodatečnému dotvrzení vrstvy lepidla a tedy spoj dosáhnul větších hodnot maximálního smykového napětí. Vzhledem ke skutečnosti, že vzorky č. 1 a č. 2 byly zkoušeny na konci jednoho zkušebního dne a vzorky č. 3 a č. 4 na začátku dne druhého, je pravděpodobný právě tento vliv na max. smykovou pevnost spoje.

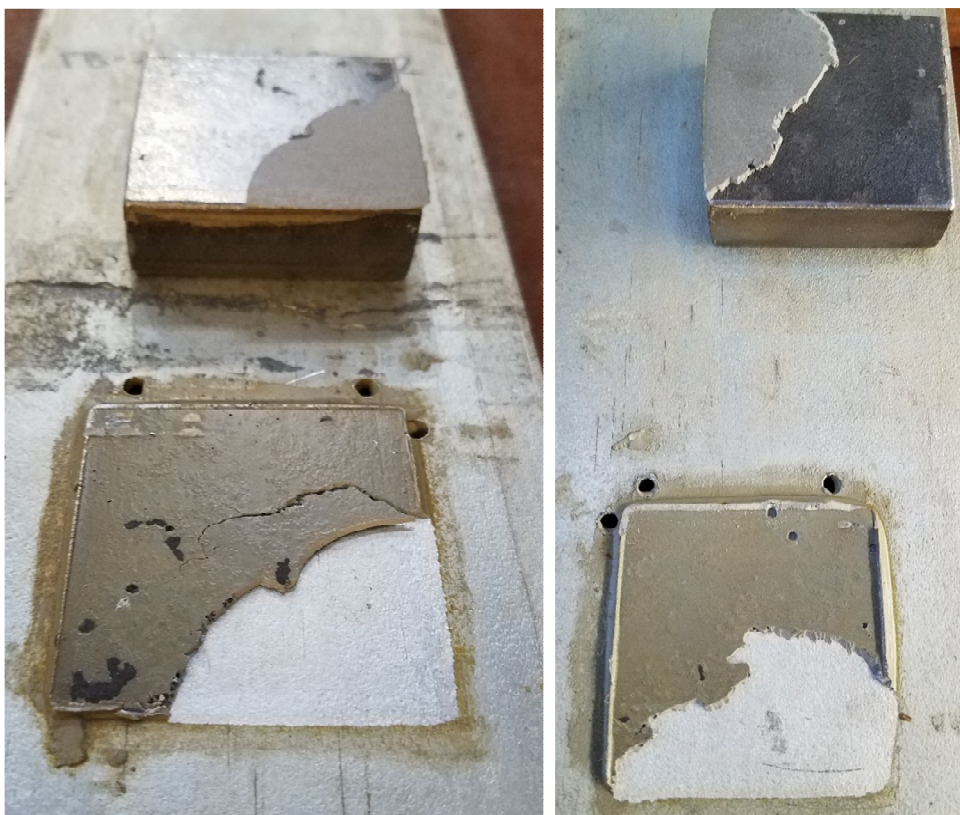
Jak již bylo zmíněno, hodnoty poměrných přetvoření vrstvy lepidla byly získané velmi zjednodušeným způsobem (přepočtem z posunu příčnicku) a vzhledem k velkým odchylkám měření nebylo možné z těchto hodnot vyvodit určitý závěr nebo sledovat jakýkoliv trend. Hodnoty posunů, získané přepočtem, přibližně odpovídají očekávaným výsledkům, nicméně postup dosažení těchto hodnot je velmi zkreslený a neprůkazný. Průměrná hodnota poměrného přetvoření činila 0,043.

V rámci celkového hodnocení (viz tab. 7.4) tedy nejsou smykové deformace zahrnuty mezi výsledky měření a jsou zde uvedena pouze jako orientační hodnota pro vykreslení grafů. Na grafu (obr. 7.25) je viditelný poměrně častý prokluz vzorků v čelistech zkušebního stroje. Důvod prokluzu zůstal neznámý.

Do výsledného srovnání byla zahrnuta pouze max. smyková pevnost spoje a způsob jeho porušení.



obr. 7.25: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků ocel – ocel za teploty 200°C – poměrná smyková deformace je pouze orientační



obr. 7.26: Adhezní porušení od obou substrátů (zinek / ocel) – vzorek č. 2 (vlevo) a vzorek č. 3 (vpravo) ze sady za teploty 200°C, viditelné bublinky ve vrstvě lepidla

7.5.4. Sada vzorků ocel – ocel za teploty 230 °C

Pro všechny vzorky zkoušené za teploty 230 °C bylo rozhodující adhezní porušení, stejně jako u předchozích vzorků. Výrobce udávaná pevnost lepidla je při 230 °C snížena na přibližně 60%. Opět bylo pro všechny vzorky typické adhezní porušení jak od vrstvy zinku, tak od konstrukční oceli. Při vizuálním hodnocení jednotlivých vzorků bylo možné pozorovat větší protažení vrstvy lepidla, také barva se změnila z šedé na tmavě hnědou.

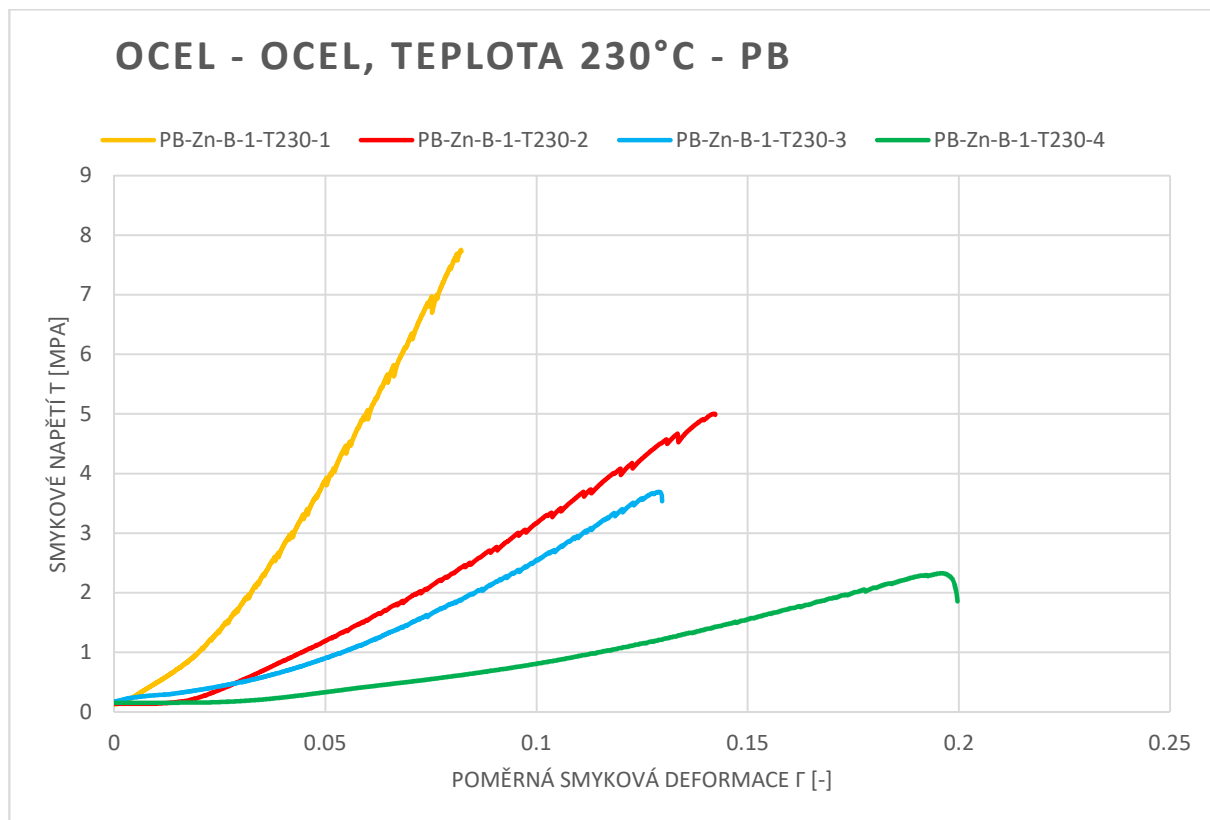
Průměrná hodnota maximálního smykového napětí pro sadu ocel – ocel za teploty 230 °C činila **4,693 MPa**. Oproti údajům výrobce byla průměrná smyková pevnost spoje snížena na 25%. Směrodatná odchylka této sady se pohybovala okolo 2,3 MPa, rozdíly pevností mezi jednotlivými vzorky byly stále velké.

Na rozdíl od vzorků zkoušených za teploty 200 °C, kde bylo možné pozorovat trend pravděpodobného dotvrzení předeříváných vzorků v peci, je zde pozorovatelný obrácený trend u déle předeříváných vzorků. Z důvodu časové náročnosti všech měření bylo pro vzorky z této sady nastaveno předeřívání v univerzální peci na 245 °C, vzorky se vytahovaly pro měření postupně od č. 1 do č. 4. Klesající trend celkové smykové pevnosti, od prvního do posledního vzorku, byl pravděpodobně způsoben nedostatečným předeříváním prvních vzorků.

Stejně jako u vzorků zkoušených za teploty 200 °C byly hodnoty poměrných přetvoření vrstvy lepidla získané velmi zjednodušeným způsobem (přepočtem z posunu příčnicku), a vzhledem k velkým odchylkám měření nebylo možné z těchto hodnot vyvodit určitý závěr nebo sledovat jakýkoliv trend. Hodnoty „skutečných“ posunů přibližně odpovídají očekávaným výsledkům, nicméně postup dosažení těchto hodnot je velmi zkreslený a neprůkazný. Průměrná hodnota poměrného přetvoření činila 0,137.

V rámci celkového hodnocení (viz tab. 7.4) tedy nejsou smykové deformace vrstvy lepidla zahrnuty mezi výsledky měření a jsou zde uvedena pouze jako orientační hodnoty pro vykreslení grafů. Na grafu (obr. 7.27) je viditelný poměrně častý prokluz vzorků v čelistech zkušebního stroje. Důvod prokluzu zůstal neznámý.

Do výsledného srovnání byla zahrnuta pouze max. smyková pevnost spoje a způsob jeho porušení.



obr. 7.27: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků ocel – ocel za teploty 230°C – poměrná smyková deformace je pouze orientační



obr. 7.28: Adhezní porušení od obou substrátů (zinek / ocel) – vzorek č. 1 (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo) ze sady za teploty 230°C, viditelné bublinky ve vrstvě lepidla



obr. 7.29: Adhezní porušení od zinkového povrchu – přední část vzorku č. 4



obr. 7.30: Adhezní porušení od ocelového povrchu – zadní část vzorku č. 4

Zvláštní porušení nastalo u vzorku č. 4, kde se oddělily boční ocelové dílce na obou stranách, nicméně na jedné straně nastalo adhezní porušení mezi lepidlem a vrstvou konstrukční oceli (bočního dílec) a na druhé straně nastalo adhezní porušení mezi lepidlem a vrstvou pozinkovaného plechu (středový dílec).

7.5.5. Vyhodnocení druhé části s lepidlem Permabond ES5504

Samotný průběh zkoušek nebyl tak úspěšný, jako tomu bylo v první části s lepidlem Crestabond. Výsledné hodnoty smykových pevností měly vysokou směrodatnou odchylku, která poukazovala na rozdílné výsledky měření. Pro získání lepší představy o fungování takto navrženého spoje za zvýšené teploty by bylo třeba provést více měření. Navíc bylo možné u vzorků pozorovat systematické chyby měření, jako trend zvýšené smykové pevnosti pro vzorky déle předehřívané za teploty 200 °C, nebo trend snížené smykové pevnosti pro vzorky déle předehřívané za teploty 245 °C.

V případě měření poměrných deformací byly za průkazné považovány pouze hodnoty pro sadu referenční, kde byly deformace vrstvy lepidla měřeny pomocí potenciometrů. Původně navrhovaný způsob pro získání skutečných přetvoření z posunu příčnicku byl velmi zjednodušený a ukázal se nevhodný (viz kap. 7.5).

Náhodné chyby se neobjevily (na rozdíl od první části s jiným lepidlem) u měření deformací potenciometry, Možným slabým místem vzorků mohla být opět skutečná tloušťka lepidla, která byla průměrně u všech vzorků menší než 1 mm. Tato nepřesnost vznikla při technologickém postupu výroby vzorků a mohla mít vliv na celkovou únosnost spoje. Také vady ve vrstvě lepidla jako vzduchové bubliny nebo lokální ztenčení vrstvy lepidla se mohly vyskytnout u použitých vzorků. Technologický postup byl však dostatečně propracovaný, aby se tyto chyby vyskytovaly co nejméně.

tab. 7.6: Průměrné výsledky měření z druhé části zkoušek

	MAX. SÍLA [kN]	MAX. SMYKOVÉ NAPĚTÍ [MPa]	MAX. PŘETVOŘENÍ [-]
OCEL – OCEL 20°C	94,03	18,81	0,047
OCEL – OCEL 200°C	75,86	15,17	-
OCEL – OCEL 230°C	23,47	4,69	-

Pro vybrané jednosložkové epoxidové lepidlo Permabond ES5504 bylo dosaženo předpokládaných výsledků dle stanovených cílů. Měřením referenční sady bylo dosaženo průměrné max. smykové pevnosti 18,81 MPa s ocelovým substrátem, což přibližně odpovídá hodnotě smykové pevnosti 18 – 22 MPa pro přeplátovaný spoj s hliníkovým substrátem (v souladu s ISO 4587:2003), kterou udává výrobce lepidla. U všech vzorků docházelo pouze k adheznímu porušení, za běžné teploty zpravidla mezi středovým plechem a vrstvou lepidla. U vzorků za zvýšené teploty docházelo k adheznímu porušení mezi oběma substráty.

Lepidlo má dle technického listu stanovenou provozní teplotu od -40 °C do +250 °C. U vzorků zatížených teplotou 200 °C klesla smyková pevnost průměrně na 80,6% pevnosti za běžné teploty. Výsledná pevnost se lišila od předpokladu. Výrobce v pracovním diagramu lepidla (viz příloha B) udává přibližně 95% pevnost za této teploty. Průměrná smyková pevnost vzorků však byla pravděpodobně ovlivněna předehříváním vzorků. Vzorky zkoušené za teploty 230 °C

dosáhly průměrné pevnosti pouze 25% pevnosti referenční, údaje výrobce byly okolo 50%. Výsledky měření byly pravděpodobně také ovlivněny přehříváním, stejně jako u předchozí sady.

Z hlediska celkové termické odolnosti je toto lepidlo vhodné pro použití ve spojích namáhaných smykem a krátkodobě vystavených teplotě okolo 200 °C, což také udává výrobce. Při hodnocení se musí také vzít v úvahu relativně vysoká rychlost zatěžování vzorků 1 mm/min, při dlouhodobém zatížení v konstrukci bude celková únosnost spoje ještě menší.

Celkový čas zatěžování vzorků za teploty 200°C se pohyboval v rozmezí 5 – 10 minut, u vzorků za teploty 230°C pak v rozmezí 1,5 – 3,5 minuty. Podrobnou analýzou návrhu lepeného spoje by bylo teoreticky možné navrhnout spoj s „požární odolností“ 10 nebo 15 minut, návrh spoje by však musel být podložen podrobným modelem a dalším testováním. Pro celkovou únosnost nosných konstrukčních spojů je rozhodující dlouhodobé zatížení a působení více negativních vlivů najednou. Pro získání přesnějších údajů o chování lepidla Permabond v konstrukčním spoji by bylo nutné provést více měření, případně využít metod zrychleného testování pro získání údajů o chování spojů zatížených dlouhodobě. Použití lepených spojů v konstrukcích s požadavkem na požární odolnost je tak zatím stále ve fázi výzkumu.

Lepidlo je při aplikaci méně tekuté, než lepidlo Crestabond. Lepidlo Permabond není omezeno dobou otevřenou dobou na vzduchu, vzhledem ke způsobu tvrzení. Doba přípravy vzorků se z důvodu tvrzení výrazně prodloužila, také příprava skutečných spojů by byla technologicky náročnější a dražší. Výrobce uvádí použitelnost pro širokou škálu materiálů. Lepidlo není pro svoji vysokou tuhost a způsob tvrzení použitelné pro spoje skleněných konstrukcí, při vytvrzení vzorků se skleněným substrátem došlo k překročení pevnosti skla a všechny vzorky byly znehodnoceny.

8. Výzkumná část práce – numerické modelování lepených spojů

Za účelem doplnění výzkumné části práce, která se týkala zkoušení lepených spojů za zvýšených teplot, byly sestaveny celkem dva numerické modely.

První numerický model sloužil pouze pro ověření správného nastavení materiálů, pro srovnání byly použity výsledky získané skutečným měřením. Materiálové vlastnosti lepidla byly v modelu definovány ručně tak, aby co nejlépe reprezentovali skutečný stav. Nastavení tohoto modelu je dále použito jako základ pro druhý model.

Druhý numerický model zkoumal chování lepeného spoje na příkladu atypického detailu. Jedná se o spoj kotevní desky závěsu pro technologické potrubí s ocelovým nosníkem. Vstupní předpoklady návrhu konstrukce jsou formulovány tak, aby bylo výhodnější použít lepený spoj namísto standardních způsobů kotvení, jako je spoj šroubový nebo svarový.

8.1. Použitý software – Ansys Workbench 2019 R2

Oba numerické modely byly navrženy a vyhodnoceny v software Ansys Workbench 2019 R2. Jedná se o výpočetní program používaný pro analýzu průběhu napětí, deformací, přestupu a proudění tepla a dalších fyzikálních a elektromagnetických jevů na vytvořeném fyzikálním modelu. Program pro výpočet využívá metodu konečných prvků a lze s jeho pomocí provádět i výpočty proudění tekutiny nebo plynů. Pro tvorbu geometrie modelů byla použita grafická nástavba k Ansys, program DesignModeler.

Představený software byl vybrán z důvodu volné dostupnosti studentské licence, možnosti podrobného nastavení modelu a přehledných grafických výstupů. Při modelování lepeného spoje je nastavení vstupních dat a okrajových podmínek zásadní pro fungování celého modelu.

8.2. Model č. 1 – zkušební těleso

8.2.1. Návrh modelu 1

První model byl vytvořen za účelem stanovení reálných materiálových vlastností lepidla Permabond ES5504 v software tak, aby bylo možné je použít k modelování konstrukčního spoje v druhém modelu. Jako předloha skutečného fungování lepeného spoje byly vybrány vzorky:

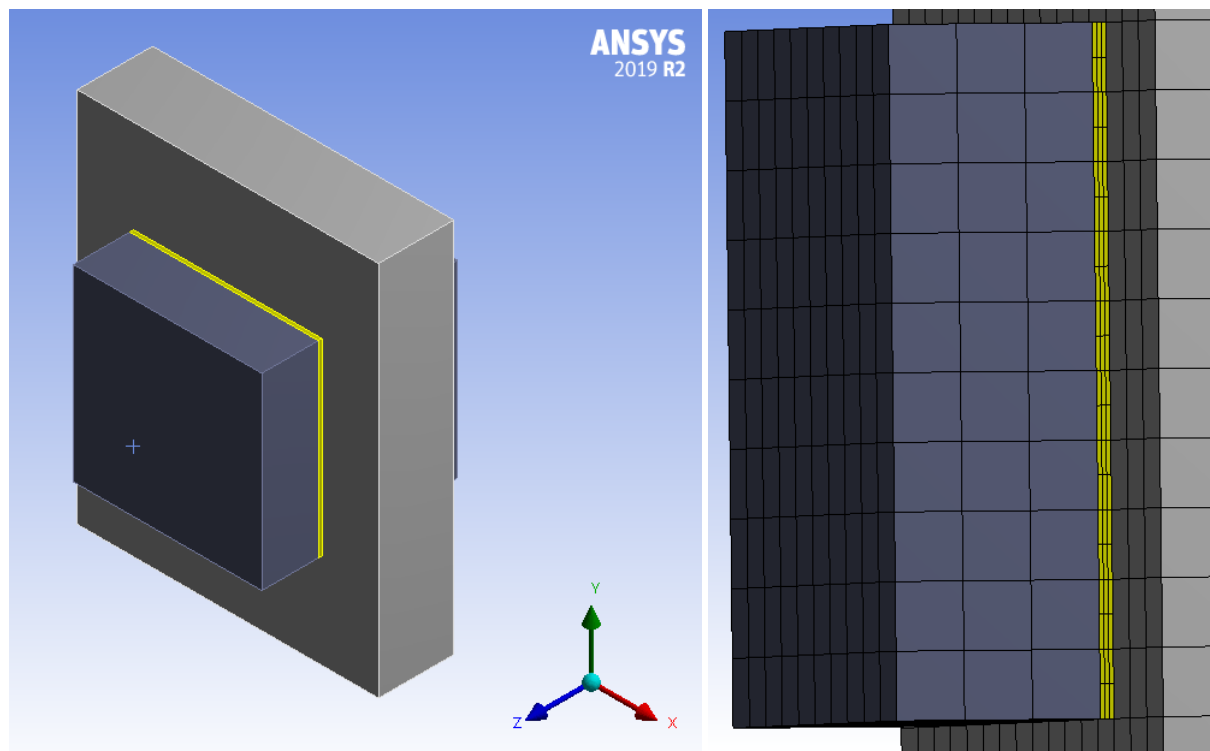
- vzorek č. 4 (R-4) z referenční sady z měření s lepidlem Permabond
- vzorek č. 4 (T200-4) ze sady zkoušené za teploty 200°C s lepidlem Permabond
- vzorek č. 2 (T230-2) ze sady zkoušené za teploty 230°C s lepidlem Permabond

Vzhledem k velkým směrodatným odchylkám měření při smykových zkouškách nebyly pro předlohu vybrány průměry hodnot, ale přímo jednotlivé vzorky. Pro materiál bočního dílce byl použitý materiál konstrukční ocel S235, pro materiál středového dílce pak galvanicky zinkovaná konstrukční ocel S235 (stejně jako u zkušebních vzorků). Pro materiál lepidla byly vlastnosti převzaty z technického listu produktu, z provedených měření a částečně byly vlastnosti doplněny tak, aby model co nejlépe odpovídal skutečnosti.

tab. 8.1: Materiálové vlastnosti použité pro výpočetní model

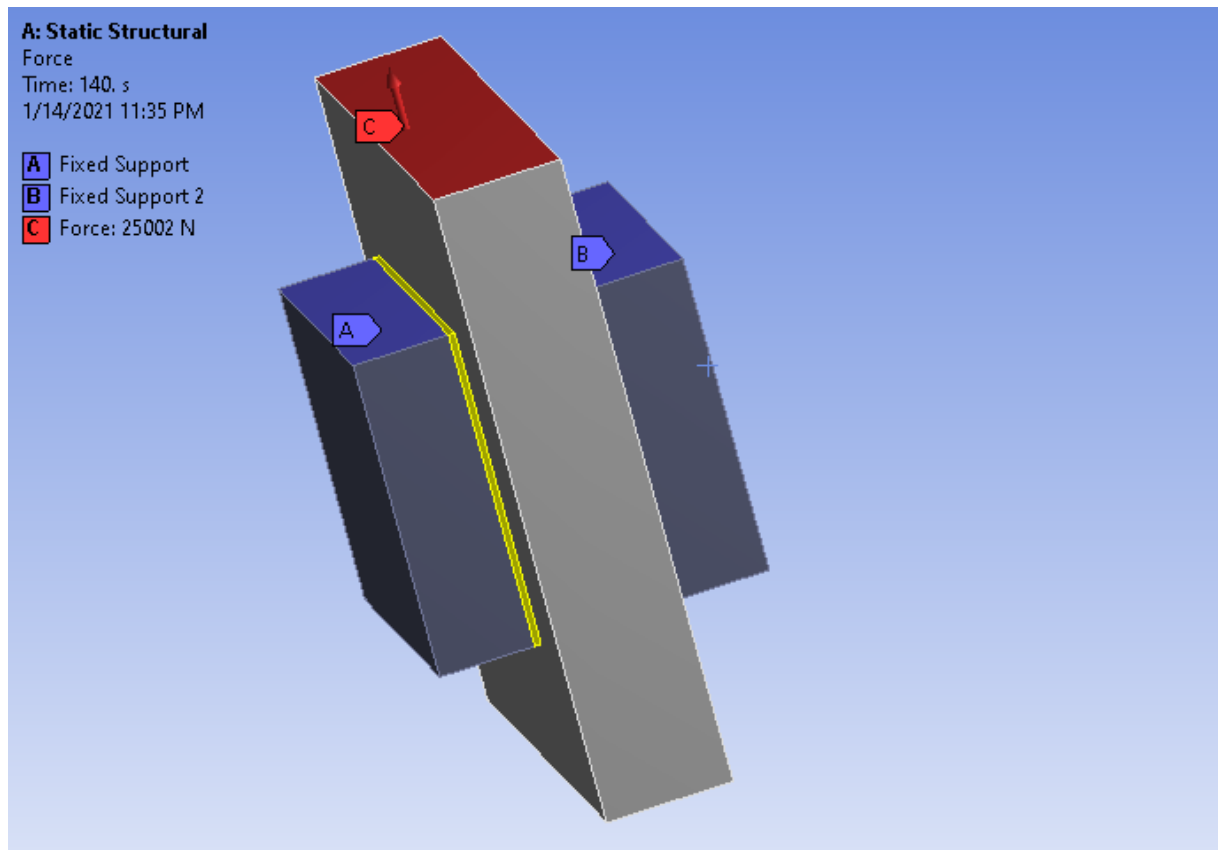
	ρ [kg.m ⁻³]	E [MPa]	G [MPa]	ν [-]	α [K ⁻¹]
OCEL S235	7850	210 000	80 770	0,3	12*10 ⁻⁶
POZINK OCEL	7850	210 000	80 770	0,3	12,2*10 ⁻⁶
PERMABOND 22°	1160	660	230	0,43	45*10 ⁻⁶
PERMABOND 200°	1160	715	250	0,43	45*10 ⁻⁶
PERMABOND 230°	1160	75	26	0,43	45*10 ⁻⁶

Geometrie modelu byla vytvořena zjednodušeně pouze pro část středového plechu s bočními díly (obr. 8.1). Rozměry bočních ocelových dílů 50 x 50 x 15 mm a tloušťka středového plechu 20 mm byly zachovány jako na skutečném zkušebním vzorku. Síť konečných prvků pro výpočet byla zhuštěna ve vrstvě lepidla pro detailnější vykreslení výsledků (obr. 8.1).



obr. 8.1: Geometrie modelu (vlevo) a zhuštění sítě prvků pro vrstvu lepidla (vpravo)

Model byl zatížen vzrůstající silou v čase a konstantní teplotou, hodnoty byly převzaty ze zkoušek. Při teplotě 22°C byla hodnota maximální síly 76,07 kN, při teplotě 200°C byla max. síla 66,31 kN a při teplotě 230°C byla max. síla 25 kN. Zatížení silou bylo zadáno v kladném směru osy y (nahoru) na celou plochu středového plechu. Pro vyvození smykového napětí ve vrstvě lepidla pak byl model fixován podporou ve směru osy y (stejně jako u zkoušek) na celé ploše bočních dílů (obr. 8.2 na další stránce).



obr. 8.2: Zatížení modelu silou (červeně) a pevné podpory na bočních dílech (modře)

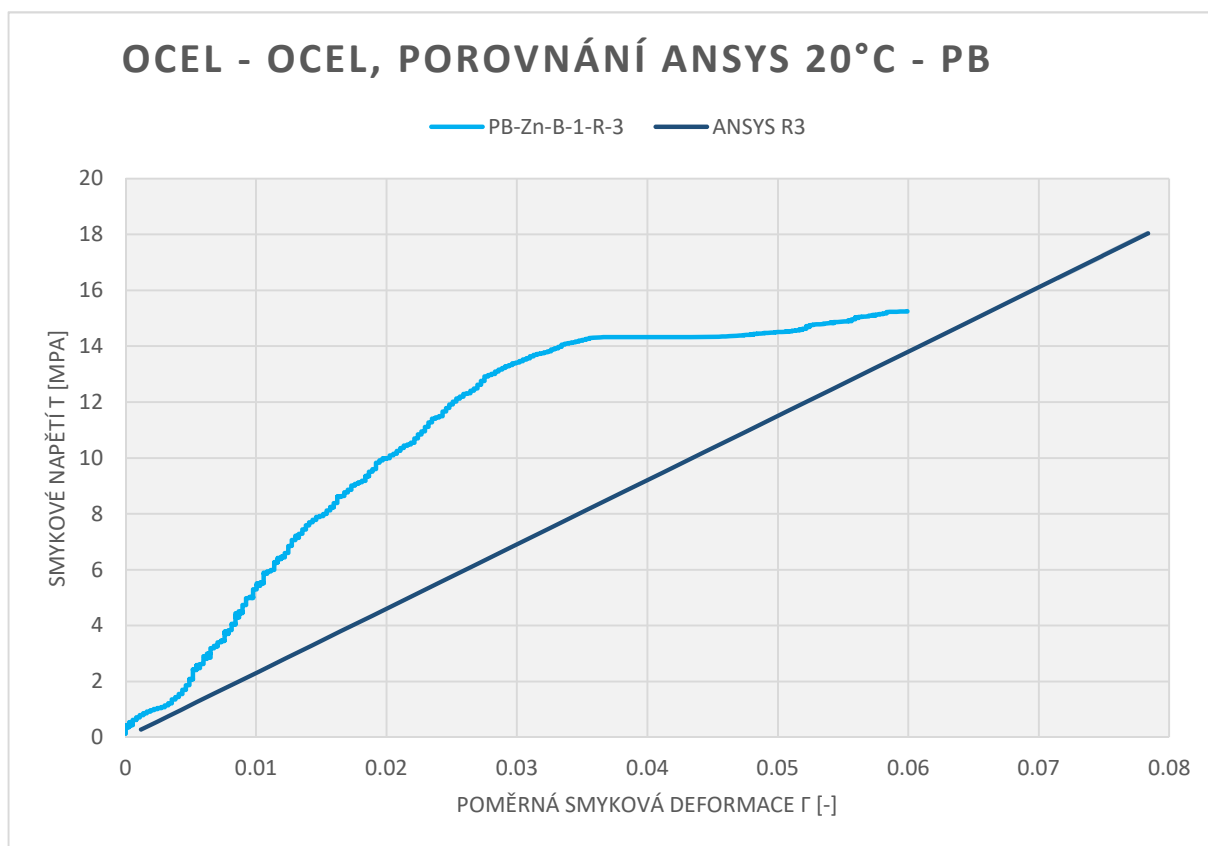
8.2.2. Výsledky modelu 1

Po korekci materiálových vlastností modelu bylo dosaženo přibližně stejných výsledků, jako při zkouškách. Koeficient teplotní roztažnosti α pro lepidlo byl převzat z technického listu, modul pružnosti ve smyku G ze skutečných měření. Ostatní materiálové vlastnosti byly doplněny pro funkci modelu a jsou shrnuty v tab. 8.1.

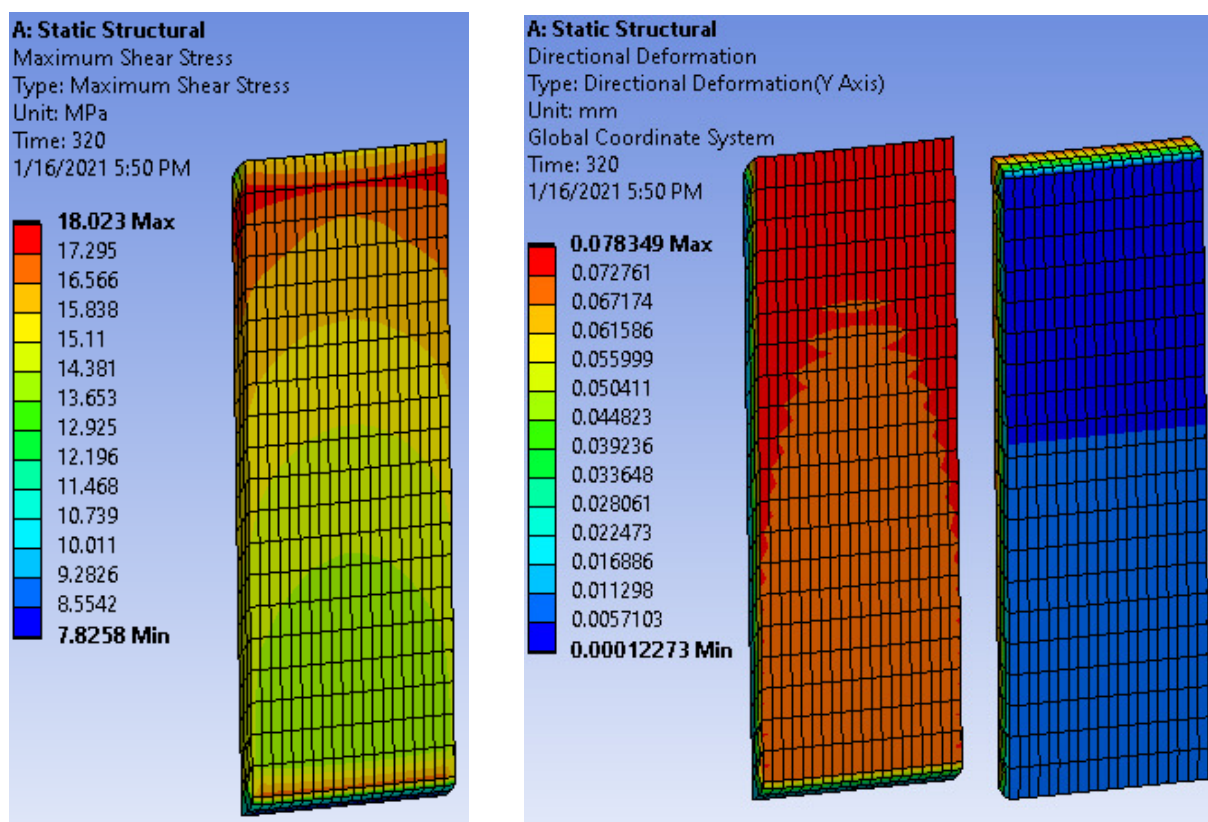
V numerickém modelu bylo dosaženo většího maximálního smykového napětí, než u zkoušek. Důvodem je zjednodušený přepočítání smykového napětí, který byl použit pro získání smykových napětí z měření. Vztah $\sigma = \frac{F}{A}$ nezohledňuje nelineární rozložení napětí ve vrstvě lepidla, kde ve skutečnosti vznikají špičky napětí v krajní vrstvě lepidla (obr. 4.8).

Pro tloušťku vrstvy lepidla 1 mm se hodnota poměrného smykového přetvoření [$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$] rovná hodnotě celkového smykového přetvoření [mm]. Výsledky v software byly tedy zobrazeny funkcí celkových deformací ve směru zatížení (Directional Deformation Y Axis).

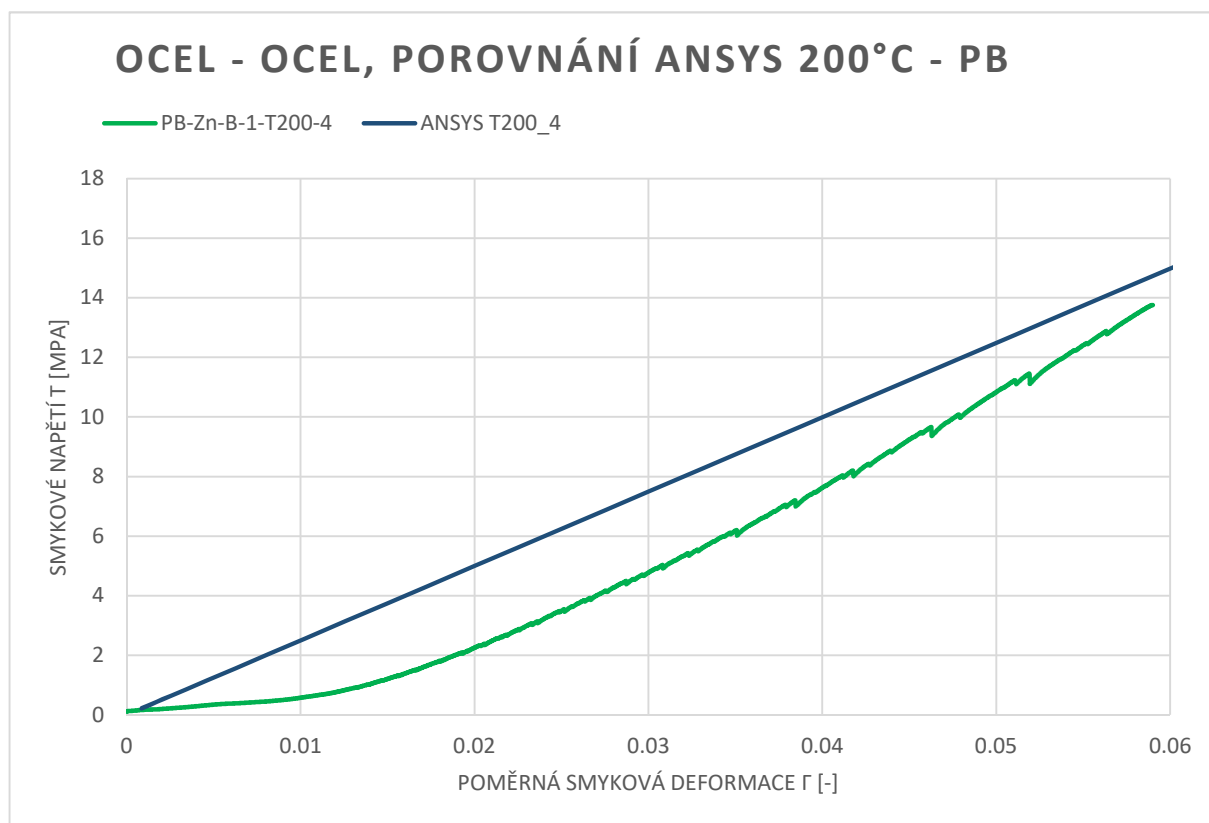
Výsledky numerických modelů jsou shrnuty na následujících obrázcích a grafech.



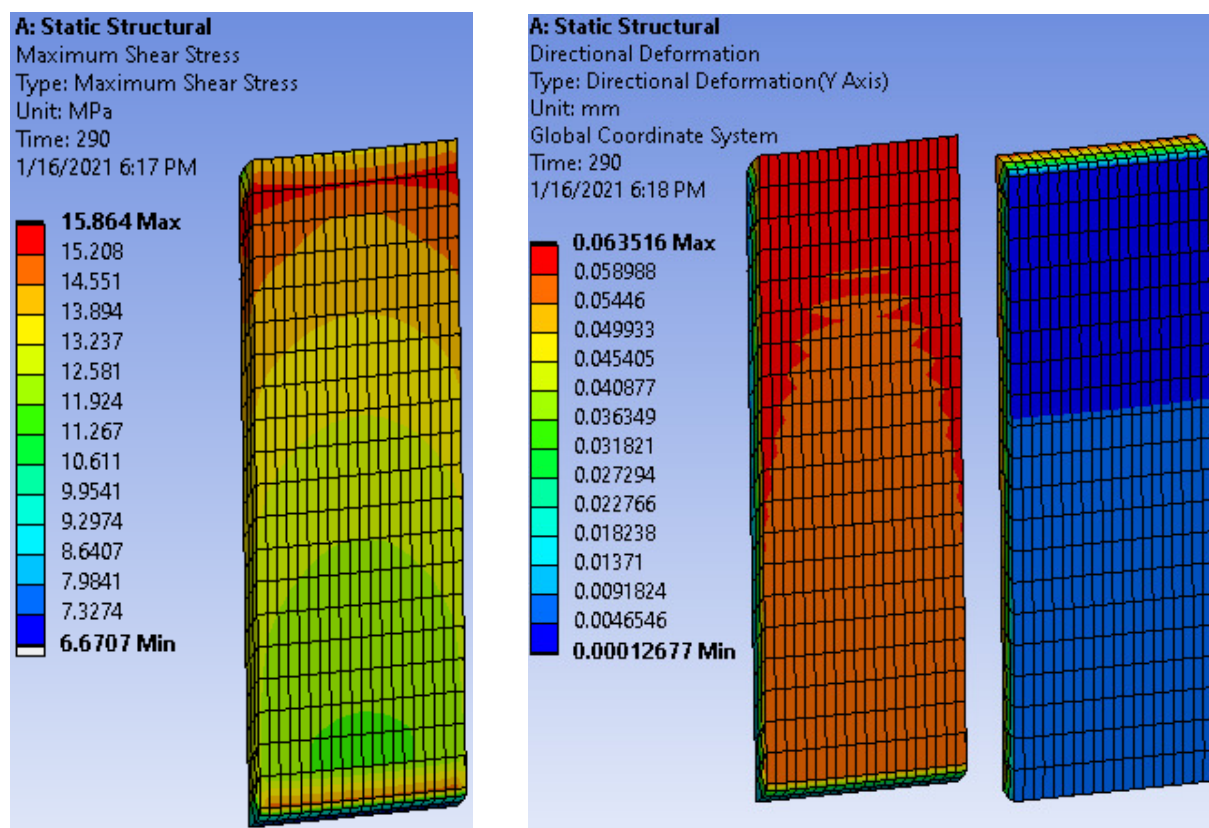
obr. 8.3: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 3 za teploty 20°C a matematického modelu ze software Ansys



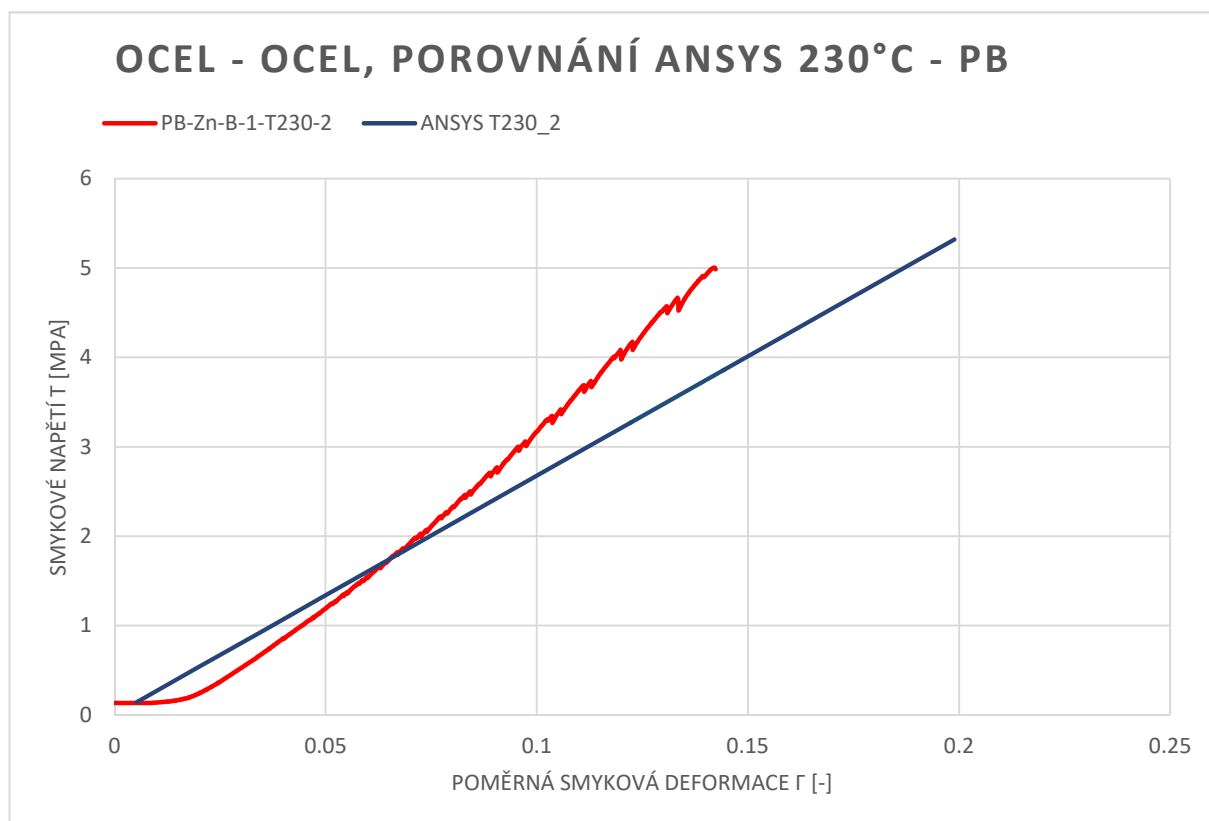
obr. 8.4: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 20°C



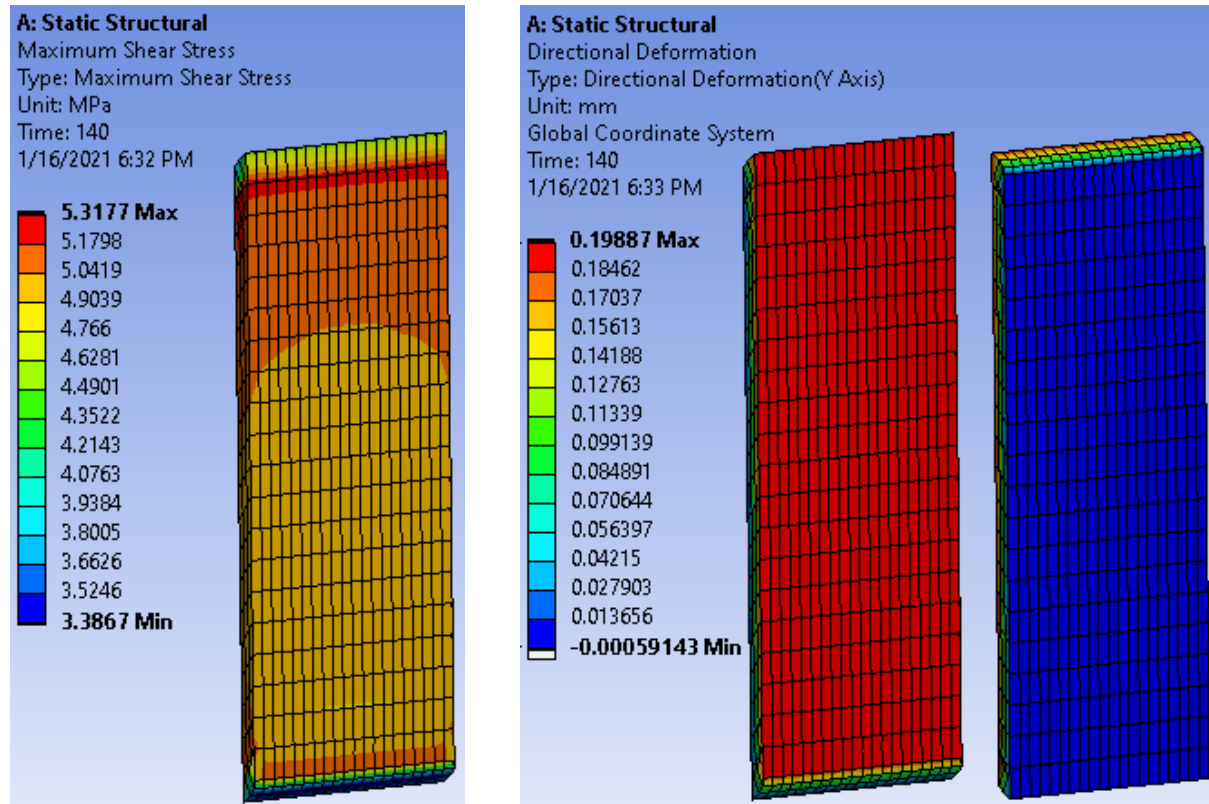
obr. 8.5: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 4 za teploty 200°C a matematického modelu ze software Ansys



obr. 8.6: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 200°C



obr. 8.7: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 2 za teploty 230°C a matematického modelu ze software Ansys



obr. 8.8: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 230°C

8.3. Model č. 2 – lepený spoj v návrhové konstrukci

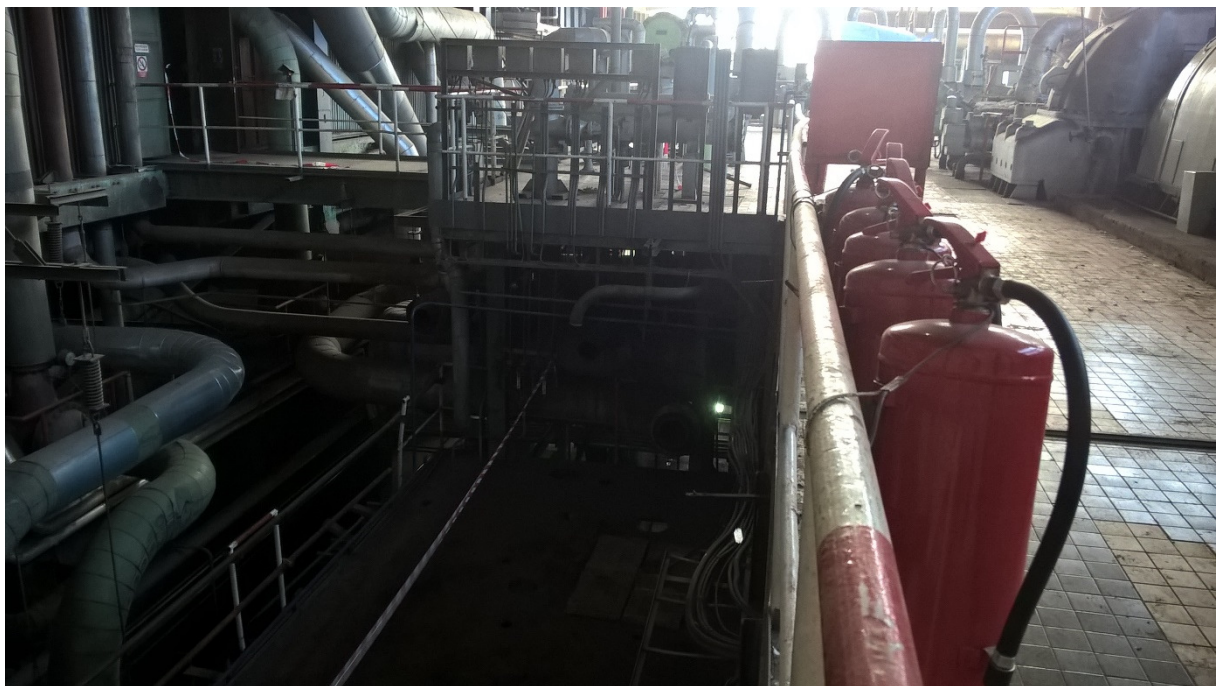
8.3.1. Předpoklad použití lepeného spoje ve skutečné konstrukci

Předpokladem pro použití lepeného spoje, namísto tradičního šroubového nebo svarového spoje, je konstrukce, kde je z určitého důvodu použití tradičního kotvení nevýhodné. Kotvení lepením lze s výhodou použít například u dodatečně vkládaných nebo opravovaných konstrukcí, kde by bylo svařování nebo montáž pomocí šroubů komplikované.

Svařované spoje se obtížně provádějí na pozinkovaných ocelových konstrukcích. Zinkování rozeznáváme galvanické a žárové. Žárové zinkování je trvanlivější a odolnější, vrstva zinku je poměrně silná a dostane se na všechny povrchy ve styku s lázní, včetně uzavřených profilů. Používá se zejména pro konstrukce ve venkovním prostředí. Galvanické zinkování se provádí v tenkých vrstvách a není tolik odolné proti poškození. Naproti tomu má lepší vzhled, vrstva je stejnoměrná a lesklá, proto se tato úprava používá např. pro nenosné vnitřní konstrukce, ocelové kotevní prvky a šrouby.

Při svařování zinkované konstrukce na stavbě se musí narušit ochranná vrstva zinku, provést svar a pak jej dodatečně pozinkovat. Toto se provádí zpravidla zinkovým sprejem nebo barvou s příměsí zinku. Výsledný efekt však často nedosahuje parametrů žárového, ani galvanického zinkování.

Šroubové spoje jsou zase limitovány rozměry styčnickových desek, případně rozměry nosníku. Šroub musí být vzdálen min. 30 mm od hrany profilu, aby bylo možné manipulovat s utahovacím klíčem. Dále je technickou normou stanovena min. vzdálenost osy šroubu od okraje styčnickové desky na $1,2 d$, kde d je průměr šroubu, což při běžně používaném šroubu M16 znamená přírůstek cca 20 mm. Styčnicková deska tedy musí přesahovat za hranu profilu o přibližně 50 mm a více.





obr. 8.9: Příklady provozu / konstrukcí, kde by bylo možné uplatnění lepeného spoje

V provozech, jako jsou kotelny, teplárny a jiná energetická centra, se často nachází souběh nebo křížení potrubí, kde lze jen velmi těžko provádět svarové nebo šroubové spoje. V mokřých provozech se navíc provádí zinkování jako protikorozní úprava i u vnitřních konstrukcí. Právě v takovýchto speciálních případech by mohla být využita technologie lepení, která nevyžaduje žádné specifické nástroje, ochranu před jiskrami, dýmem a ostrým světlem jako u sváření, ani není tak náročná na prostorové uspořádání spoje a dostupnost při provádění.

8.3.2. Návrh modelu 2

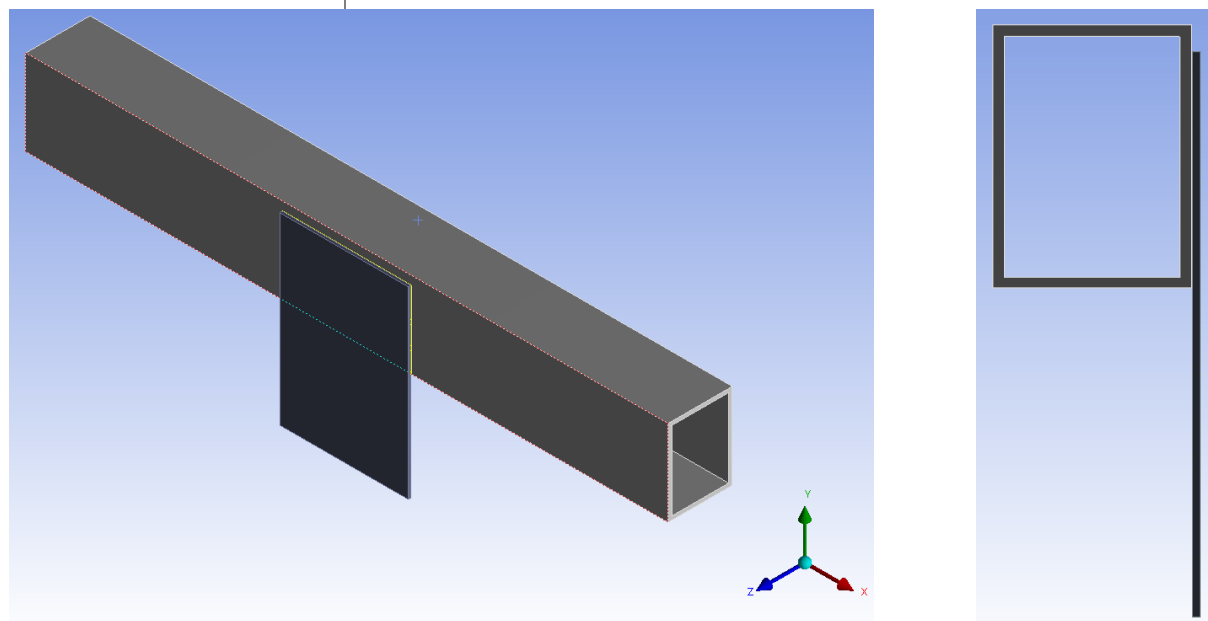
Druhý model byl sestaven jako příklad použití lepeného spoje ve skutečné konstrukci. Numerický model analyzuje smykem namáhaný spoj pozinkovaného ocelového nosníku s kotevní deskou pro závěs technologického potrubí, v objektu teplárny. Technologickým potrubím se předpokládá vedení horkých kapalin nebo plynů o teplotě 250°C. Celková hmotnost potrubí včetně náplně byla stanovena na 350 kg na jeden závěs. Kotevní šroubové prvky potrubí mají zpravidla max. nosnost 250 kg [26] a svarový spoj nebylo výhodné použít, z důvodu mokřého provozu uvnitř objektu a možnému narušení zinkové vrstvy.

Geometrie modelu byla navržena zjednodušeně. Hlavní nosník byl modelován v délce 1,5 m, jako uzavřený čtvercový profil 2 x U200. Uprostřed nosníku byl osazen kotevní plech tloušťky 6 mm, rozměr 300 x 430 mm. Kotevní plech byl připojen k nosníku vrstvou lepidla Permabond, tloušťky 1mm, o celkové ploše spoje 54 000 mm².

Materiálové řešení konstrukce je obdobné jako u modelu č. 1. Hlavní nosník byl navržen z pozinkované oceli S235, kotevní plech byl zjednodušeně uvažován z konstrukční oceli S235 a spojovacím materiálem bylo lepidlo Permabond ES5504. Mechanické a fyzikální vlastnosti byly převzaty z předchozího modelu (viz tab. 8.1). V následující tab. 8.2 jsou popsány pouze vybrané vlastnosti použitých materiálů.

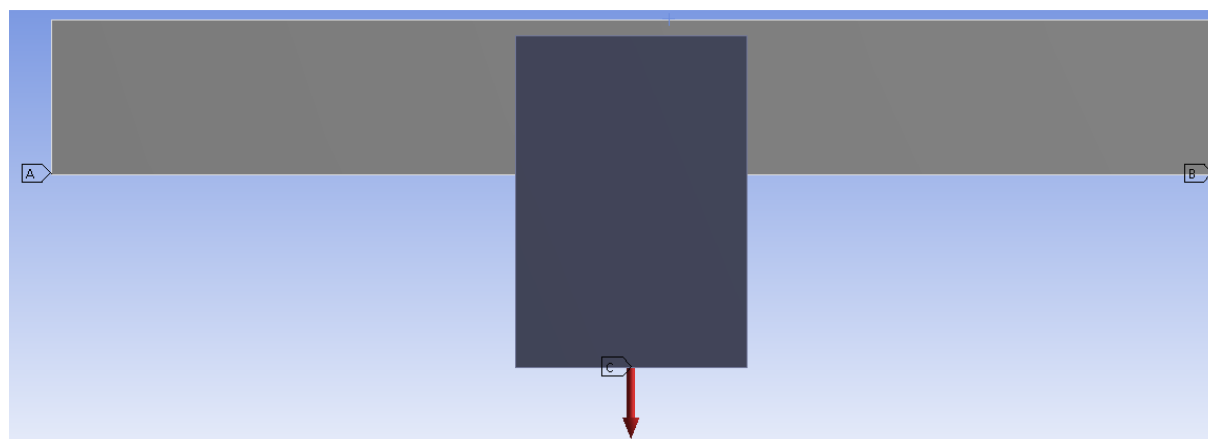
tab. 8.2: Vybrané vlastnosti materiálů v modelu [25]

	λ [W/m K]	c [J/kg K]	ν [-]	α [K ⁻¹]
OCEL S235 20°C	53	440	0,3	12*10 ⁻⁶
OCEL S235 230°C	46	540	0,3	12,2*10 ⁻⁶
PERMABOND 20°	0.25	1100	0,43	45*10 ⁻⁶
PERMABOND 230°	0.28	1100	0,43	45*10 ⁻⁶



obr. 8.10: Geometrie modelového spoje kotevní desky s nosníkem

Model byl po stranách (ze spodní strany) podepřen kloubovými podporami jako prostý nosník. Zadní část nosníku a plochy průřezu na obou stranách byly fixovány proti kroucení. V návrhové situaci byl model zatížen silou 3,5 kN a teplotou 250°C. Obě zatížení byla umístěna na celou plochu spodní strany kotevní desky. Zatížení teplotou má představovat ohřívání celé konstrukce od vedení horkých látek v potrubí. Pro zajištění správného výpočtu bylo na ostatní (neohřívané) povrchy konstrukce nastaveno sálání tepla do okolí, teplota okolí v provozu se uvažuje 80 °C.

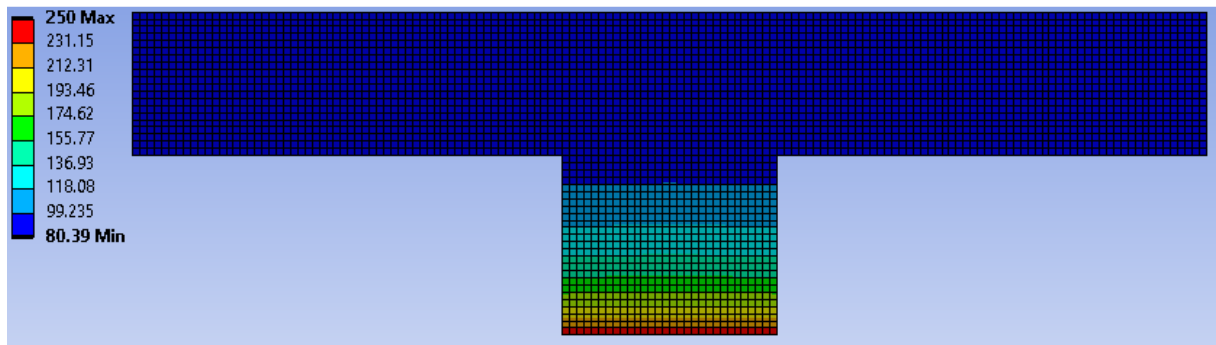


obr. 8.11: Zatížení silou směrem dolů (červeně) a kloubové podpory na krajích nosníku (A, B)

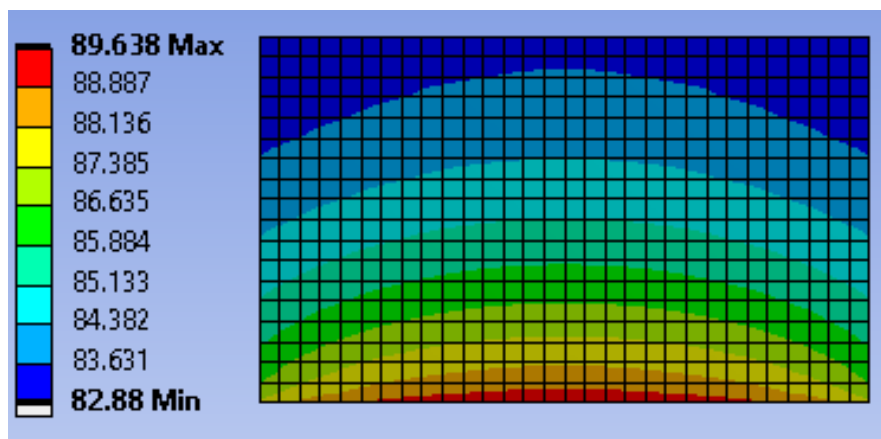
Pro výpočet prostupu tepla konstrukcí byl model nejdříve podroben tepelné analýze v software Ansys Workbench (Steady State Thermal Analysis). Vypočtené teploty uvnitř materiálů byly dále použity jako teplotní zatížení pro statickou analýzu (Static Structural).

8.3.3. Výsledky modelu 2

Prvně jsou na obr. 8.12 a 8.13 zobrazeny výpočtem stanovené teploty uvnitř materiálů v modelu. Z výsledků je patrné, že v takto formulovaném příkladu skutečné konstrukce nedojde k ohřátí vrstvy lepidla na více než 90 °C.

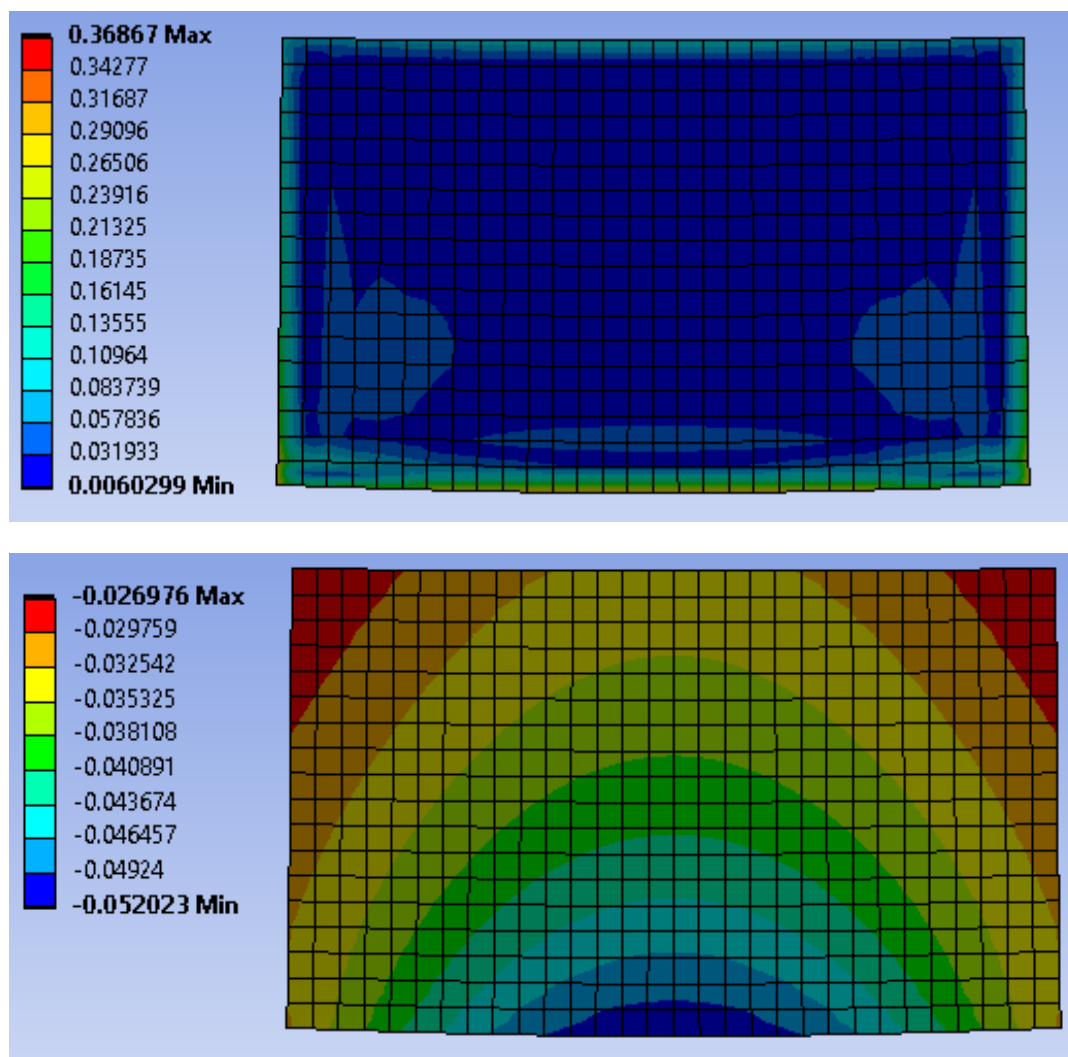


obr. 8.12: Průběh teploty v celém modelu, teplota 250°C simuluje závěs technologického potrubí, které ohřívá celou konstrukci



obr. 8.13: Průběh teploty ve vrstvě lepidla, od stanoveného zatížení dosahuje maximální teplota ve vrstvě lepidla necelých 90°C

Po zatížení teplotou, která je znázorněna na obr. 8.13, byla provedena statická analýza konstrukce, zahrnující jak teplotní zatížení, tak svislé zatížení silou od navrženého potrubí. Výsledné smykové napětí v takto formulovaném příkladu nedosahovalo hodnot větších než >0,4 MPa, při max. poměrné smykové deformaci 0,052. Tyto výsledky jsou patrné z obr. 8.14 a 8.15. Modelovaná konstrukce byla ohřívána od potrubí pouze na malé ploše, a tudíž byly i výsledné teploty uvnitř vrstvy lepidla nízké.



obr. 8.14: Průběh smykového napětí ve vrstvě lepidla, maximum = 0,37 MPa

obr. 8.15: Průběh poměrného smykového přetvoření ve vrstvě lepidla, při max. smykovém napětí dosahuje hodnot 0,052 (záporné hodnoty označují pouze opačný směr na ose Y)

Z dosažených výsledků je patrné, že konstrukční spoj zvládne bez problému přenést všechna zatížení, která byla stanovena pro potřeby tohoto příkladu. Smyková pevnost lepidla za 200 °C byla měřením stanovena na 15,17 MPa, max. smykové napětí v modelu nepřesáhlo 0,4 MPa.

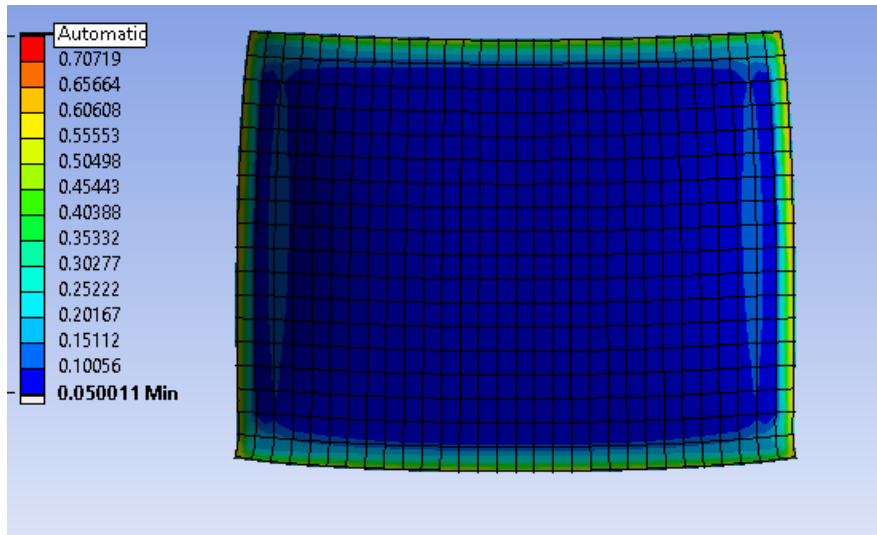
Takto navržený spoj by bylo možné použít jako alternativu k tradičním způsobům kotvení v představené konstrukci. Vzhledem k charakteru modelované situace by však bylo nutné nejprve experimentálně určit chování lepidla ve spoji za působení střednědobých, případně dlouhodobých zatížení. Představená konstrukce bude ve skutečnosti namáhána delší dobu, a tedy se mohou negativně projevit degradující vlastnosti lepidla v čase, případně další chemické nebo klimatické vlivy.

8.3.4. Doplnění výsledků numerického modelu 2

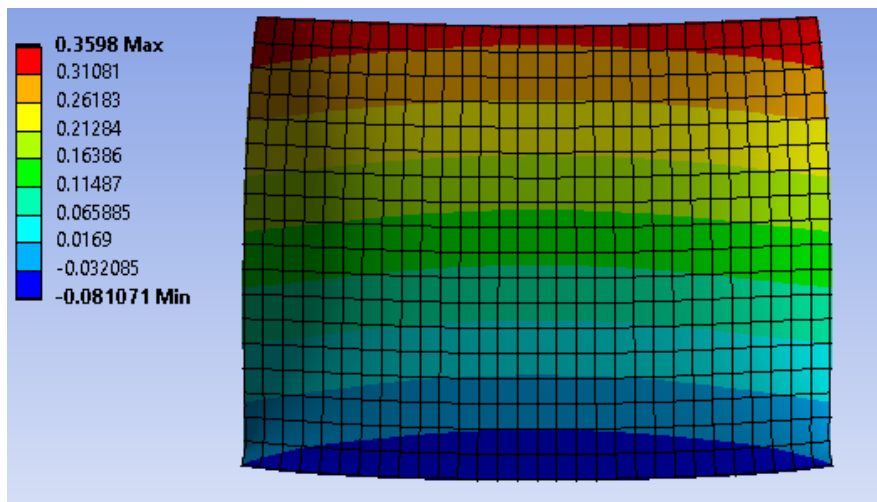
Jako doplňkový příklad využití v praxi byla modelována situace, kde bylo ve vrstvě lepidla dosaženo teploty 230 °C. Model připojení kotevní desky a ocelového nosníku zůstal stejný, změnilo se pouze zatížení teplotou. Cílem bylo ověřit pevnost spoje ve smyku za vyšší teploty,

než představoval předchozí příklad skutečné konstrukce. S ohledem na množství proměnných při vstupních hodnotách bylo pevně stanoveno výchozí zatížení teplotou a nebylo rozebráno, za jakých okolností k němu může dojít.

Zatížení teplotou 230 °C bylo zadáno na všechny prvky modelu (zjednodušený postup). Kotevní plech byl ze spodní strany opět zatížen potrubím (síla 3,5 kN na celé ploše). Výsledky analýzy jsou zobrazeny na následujících obr. 8.16 a 8.17.



obr. 8.16: Max. smykové napětí ve vrstvě lepidla, zatížení silou a teplotou 230 °C



obr. 8.17: Max. poměrné přetvoření ve vrstvě lepidla při zatížení silou a teplotou 230 °C

Max. hodnota smykové pevnosti lepidla za teploty 230°C, stanovená z měření vzorků, činila 5,0 MPa. V modelu tedy nebylo dosaženo max. smykového napětí, které bylo zjištěno experimentálně, nicméně poměrné smykové přetvoření lepidla v modelu dosáhlo hodnoty 0,36. Takto navržená konstrukce za teploty 230 °C vykazuje velké hodnoty poměrného přetvoření, což by mohlo znamenat omezenou použitelnost spoje v představené situaci. Vzhledem k neprůkazným výsledkům poměrných přetvoření při zkouškách lepidla se nedá považovat nastavení modelu za dostatečně přesné pro praktické využití a ve skutečnosti se může lepený spoj chovat odlišně.

9. Závěr diplomové práce

Zkoušky těles malých rozměrů s lepidlem Crestabond® M7-05 potvrdili, že lepidlo není vhodné pro smykem namáhané spoje skleněných konstrukcí, současně vystavené zvýšeným teplotám.

Za běžné teploty (22 °C) nebylo u vzorků dosaženo maximální pevnosti lepidla, tělesa se porušila drcením skleněného substrátu. Za běžné teploty bylo lepidlo schopné přenést poměrně velké zatížení, při malých smykových deformacích. Lepidlo se chovalo jako velmi pevné a tuhé. Z toho důvodu by bylo výhodnější jej použít např. v bodovém konstrukčním spoji, kde by byly více využity jeho vlastnosti.

Za zvýšené teploty 80 °C docházelo k adheznímu porušení od vrstvy skla. Za teploty 60 °C docházelo k adhezně koheznímu porušení, jak od vrstvy skla, tak od středového plechu. Materiál středového plechu (hliník / pozinkovaná ocel) neměl vliv na únosnost spoje. Adheze ke skleněnému substrátu byla výrazně snížena za zvýšených teplot. Z toho důvodu není toto lepidlo vhodné pro takto navržený spoj, potažmo pro jakékoliv spoje skleněných konstrukcí s provozní teplotou přesahující 60 °C.

Tělesa malých rozměrů, pro zkoušky s lepidlem Permabond ES5504, byla původně navržena také se skleněným substrátem (bočním dílcem) a kovovým středovým plechem. Technologie vytvrzování lepidla za teploty 150 a 200 °C však znemožňuje toto lepidlo použít pro skleněné konstrukce - při procesu tvrzení vznikalo ve vrstvě skla napětí větší, než pevnost materiálu, a došlo tak k prasknutí skleněných dílů u všech vzorků. Dále byly zkoušeny vzorky s bočním dílcem z konstrukční oceli.

Za běžné teploty byly výsledky měření srovnatelné s údaji od výrobce lepidla. Ve všech případech došlo k adheznímu porušení od středového plechu. Bylo možné sledovat malou adhezi zinkové vrstvy, která částečně zůstala po porušení vzorku nalepena na vrstvu lepidla.

Za zvýšené teploty 200 a 230 °C docházelo k adheznímu porušení od obou substrátů. Adheze k oběma povrchům byla snížena natolik, že vrstva zinku nebyla viditelně ovlivněna. Výsledky měření za zvýšených teplot byly negativně ovlivněny rozdílným předehříváním vzorků, to pravděpodobně způsobilo velké směrodatné odchylky naměřených hodnot. Pro lepší pochopení skutečného chování lepidla by bylo potřeba provést více zkoušek.

Lepidlo Permabond je vhodné pro konstrukční spoje krátkodobě namáhané statickým zatížením a teplotou nepřesahující 200 °C. Pevnost lepidla výrazně klesá po překročení teploty ~200 °C. Doba zatěžování zkušebních vzorků (za zvýšené teploty) se pohybovala od 1,5 do 10 minut, teoreticky by tak bylo možné navrhnout spoj s požární odolností okolo 15 minut. Takový návrh by však musel být podpořen detailním požárně inženýrským přístupem a dalšími zkouškami.

V závěru práce byl představen modelový příklad skutečné konstrukce a spoje ve smyku, s předpoklady pro použití spoje lepeného namísto spoje šroubového nebo svarového. V modelovém příkladu nebylo dosaženo zvýšených teplot ~200 °C, jako při měření. Z toho důvodu byl příklad skutečné konstrukce doplněn o model zjednodušeně zatížený vyšší teplotou, tj. 230 °C. Pro oba modely nebyla dosažena max. smyková pevnost lepidla, a tedy se dá konstatovat, že při podmínkách stanovených příkladem by bylo možné resp. výhodné lepený spoj využít.

Pro numerické modely by bylo vhodné získat přesnější hodnoty z měření, aby modely více odpovídaly skutečnému stavu. Modelování je v předložené práci také omezeno na statické a teplotní zatížení, ve skutečnosti může být rozhodující působení např. povětrnostních, nebo chemických vlivů, cyklických zatížení aj. Použití matematických modelů v praxi však vyžaduje velmi pokročilé znalosti software a nastavení modelů musí být provedeno velmi přesně, jinak jsou výsledky nepoužitelné. Použití modelů musí být také vždy podpořeno experimentální analýzou řešeného spoje, v současnosti nelze použít numerické modely jako jediný způsob ověření únosnosti spoje. Modelování se však dá dobře využít k zjednodušenému předvídání chování lepeného spoje za zvýšených teplot, na základě předem provedených zkoušek.

10. Literatura

- [1] LUBOŠ SVOBODA A KOLEKTIV. *Stavební hmoty* [online]. 3. vydání, elektronické. Praha: doc. Ing. Luboš Svoboda, CSc., 2013. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodah/sh/SH3v1.pdf>
- [2] LAUFS, W a A LUIBLE. *Úvod do použití skla v moderních budovách*. Praha: České vysoké učení technické, 2003. ISBN 978-80-01-02849-0.
- [3] THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. *Structural use of glass in buildings (second edition) February 2014*. London, United Kingdom: The Institution of Structural Engineers, 2014. ISBN 978-1-906335-25-0.
- [4] HALDIMANN, M., A. LUIBLE a M. OVEREND. *Structural use of glass*. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008. Structural engineering documents, 10. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [5] MACHALICKÁ, Klára. *Lepené spoje v nosných konstrukcích ze skla namáhané smykem*. Praha, 2015. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [6] KUBÍKOVÁ, Eliška. *Lepené spoje pro konstrukce ze skla*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [7] WURM, Jan. *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*. Basel: Boston : Birkhäuser, 2007. ISBN 978-3-7643-7608-6.
- [8] KUBÍKOVÁ, Eliška. *Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla: experimentální a numerická analýza*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [9] *Bezpečnostní drátosklo*. Vitrex s.r.o., 2011. Dostupné z: <http://www.vitrex.cz/vrstveni-skel-folii-evasafe/bezpecnostni-dratosklo.htm>
- [10] VÁCLAV KUPILÍK. *Druhy protipožárních skel* [online]. Praha: doc. Ing. Václav Kupilík, CSc., 2006. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/3/3-4_Druhy_protipozarnich_skel.pdf
- [11] *Drátosklo, drátěné sklo*. Sklenářství Klapka, 2020. Dostupné z: <https://www.sklenarstviklapka.cz/dratosklo-dratene-sklo>
- [12] *Tepelně upravená a tvrzená skla*. AGC Glass Europe, 2020. Dostupné z: https://www.agc-yourglass.com/sites/default/files/brochures/original/PYROBEL44583PYROBEL_BROCHUR_E_EN_LR.pdf

[13] *Protipožární sklo Vetroflam®. Saint-Gobain Construction Products CZ a.s., divize glassolutions, 2020. Dostupné z: <https://glassolutions.cz/cs/produkty/vetroflam>*

[14] FELDMANN, Markus, R KASPER, B ABELN, P CRUZ, Jan BELIS, J BEYER, J COLVIN, F ENSSLEN, Mariana ELIÁŠOVÁ, L GALUPPI, A GESSLER, C GRENIER, A HAESE, H HOEGNER, R KRUIJS, K LANGOSCH, Christian LOUTER, G MANARA, T MORGAN, J NEUGEBAUER, Vlatka RAJČÍČ, Gianni ROYER-CARFAGNI, J SCHNEIDER, S SCHULA, G SIEBERT, Z SULCOVA, Frank WELLERSHOFF, Roko ŽARNIĆ a S DIMOVA. *Guidance for European structural design of glass components: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes.* Luxemburg: European Union, 2014. ISBN 978-92-79-35094-8.

[15] ELIÁŠOVÁ, Martina. *Seminář - novinky v ocelových a dřevěných konstrukcích se zaměřením na styčníky* [online]. Praha: ČVUT, 2014. Dostupné z: http://steel.fsv.cvut.cz/infaso/09_Eliasova.pdf

[16] ČSN EN 1993-1-2: 2007 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru

[17] ČSN EN 1993-1-8: 2007 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčnic

[18] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: © Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Uvod.html>

[19] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* 2. vydání [online] Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6 Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html

[20] PETRIE, Edward M. *Handbook of adhesives and sealants*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2007. McGraw-Hill handbooks. ISBN 978-0-07-147916-5.

[21] *Základy teorie lepení. Poradenské centrum společnosti LEAR a.s.* Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20%20LEAR.pdf

[22] BROCKMANN, W., ed. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8.

[23] PIZZI, A. a K. L. MITTAL, ed. *Handbook of adhesive technology*. 2nd ed., rev.expanded. New York: M. Dekker, 2003. ISBN 978-0-8247-0986-0.

[24] DILLARD, David A., ed. *Advances in structural adhesive bonding*. Boca Raton, Fla.: CRC Press [u.a.], 2010. Woodhead publishing in materials. ISBN 978-1-84569-435-7.

[25] KUMAR A., *Study of temperature dependence of thermal conductivity in cross-linked epoxies using molecular dynamics simulations with long range interactions*, 2014 [online].

Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/263703471_Study_of_temperature_dependence_of_thermal_conductivity_in_crosslinked_epoxies_using_molecular_dynamics_simulations_with_long_range_interactions

[26] *Systémy se zachováním funkčnosti při požáru* [online]. KOPOS KOLÍN a.s., 2020.

Dostupné z: https://www.kopos.cz/sites/default/files/catalog/2020/02/po_cz.pdf

11. Seznam příloh

Příloha A – Technický list lepidla Scott Bader Crestabond ® M7-05

Příloha B – Technický list lepidla Permabond ES5504

12. Seznam obrázků

obr. 1.1: Pavilón Expo 1967, Montreal (vlevo) a muzeum Rietberg, Zürich (vpravo) [14].....	8
obr. 1.2: Bourse de Commerce, Paříž (vlevo) a botanická zahrada, Dahlem (vpravo) [14].....	8
obr. 2.1: Typická chemická skladba vápno-křemičitého skla [3].....	10
obr. 2.2: Výroba plochého skla plavením (tzv. float glass) [3]	10
obr. 2.3: Porovnání pracovního diagramu pro materiál sklo, ocel a dřevo [7]	11
obr. 2.4: Rozložení napětí v průřezu vlivem ochlazení [6].....	11
obr. 2.5: Ukázka procesu zpevnění materiálu v čase, čtvercový panel s dírou uprostřed [3].....	12
obr. 2.6: Rozdíl v napětí pro tepelně zpevněné sklo (vlevo) a chemicky zpevněné (vpravo) [3].....	13
obr. 2.7: Schéma produkce vrstveného skla (laminated glass) [7]	13
obr. 2.8: Rozdíl v porušení různých druhů vrstveného skla [6].....	14
obr. 2.9: Drátosklo [11]	16
obr. 2.10: Použití tepelně tvrzeného skla Pyropane bez mezivrstev, letiště Lyon [12]	16
obr. 2.11: Vrstvené sklo v muzeu Rietberg (vlevo) a fasáda domu v Lanškrounu (vpravo) [5]	16
obr. 2.12: Způsoby řešení mechanického spoje skleněných konstrukcí [2]	18
obr. 2.14: Spoj provedený šroubem s ložiskem [3]	18
obr. 2.13: Spoj provedený svorkou [3]	18
obr. 2.15: Příklad využití lepeného spoje, Glass Dome, Stuttgart (CMU Architecture, 2009)	20
obr. 3.1: Znázornění stavby monomeru (Ethylén) a polymeru (Polyethylén) [5]	21
obr. 3.2: Tvary makromolekul a) lineární b) rozvětvené c) prostorově síťované [18]	22
obr. 3.3: Nadmolekulární struktura a) zcela amorfní b) semi-krytalická [18]	23
obr. 3.4: Rozdělení polymerů	23
obr. 4.1: Vlastnosti různých druhů lepidel [5].....	25
obr. 4.2: Vhodné řešení geometrie lepeného přeplátovaného spoje	26
obr. 4.3: Popis vrstev ve spoji dvou lepených materiálů [6]	26
obr. 4.4: mechanické působení adhezních sil (vlevo) [21]	27
obr. 4.5: chemické působení adhezních sil (vpravo) [21].....	27
obr. 4.6 povrch nesmáčí (vlevo) a povrch smáčí (vpravo) [21].....	27
obr. 4.8: Místa s maximálním smykovým namáháním v přeplátovaném spoji [5]	29
obr. 4.9 : Rozdělení smykového napětí tuhý spoj (vlevo) a poddajný spoj (vpravo) [20]	29
obr. 5.1: Tepelná energie potřebná k rozdělení jednoduchého a provázaného řetězce [20].....	31

obr. 5.2: Redukce smykové únosnosti vlivem oxidace při stárnutí a)□- inertní prostředí, nerezová ocel	32
b)Δ- okysličené prostředí, hliník c)○- okysličené prostředí, nerezová ocel [20].....	32
obr. 5.3: Maximální provozní teplota vybraných lepidel a jejich rok objevení, obrázek je pouze informativní [23]	34
obr. 5.4: Srovnání smykové pevnosti vybraných lepidel pro spoje převážně hliníkových, nebo ocelových konstrukcí[20]	35
obr. 6.1: Business park Lotus, Mumbai 2014 – požár v budově s prosklenou konstrukcí obvodového pláště, skleněné střepy dopadaly do velké vzdálenosti od fasády	36
obr. 7.1: Geometrické schéma zkušební tělesa [mm]	38
Obr. 7.2: Značení zkušebních těles.....	38
Obr. 7.4: Možné způsoby porušení zkušebních vzorků [6]	39
obr. 7.5: Schéma zkušební sestavy [5]	41
obr. 7.6: Zkušební sestava v peci (vlevo) a sestava referenční sady (vpravo).....	41
obr. 7.7: Graf porovnání smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro vybrané vzorky z jednotlivých zkušebních sad	43
obr. 7.8: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků sklo – hliník, vzorek č. 4 nebyl zahrnut do průměru celé sady z důvodu chybného měření deformací.....	46
obr. 7.9: Porušení substrátu u vzorku č. 3 referenční sady sklo - hliník (vlevo) a u vzorku č. 1 (vpravo) – zde je vidět nalepený L úhelníček s potenciometrem	47
obr. 7.10: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků sklo – hliník za teploty 80°C.....	48
obr. 7.11: Čistě adhezní porušení u vzorku č. 2 sady sklo – hliník za zvýšené teploty	48
obr. 7.12: Adhezní porušení s drobným porušením skleněného substrátu u vzorku č. 1 (nahore) a u vzorku č. 3 (dole) sady sklo – hliník za zvýšené teploty, u vzorku č. 3 je možné pozorovat také kohezní porušení na velmi malé ploše v levém dolním rohu, toto je nevýznamné.....	49
obr. 7.13: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků sklo – ocel	50
obr. 7.14: Viditelná plocha adhezního porušení od pozinkovaného povrchu a kohezní porušení na tenké hranici, kde se lepidlo přetrhlo – vzorek č. 3 z referenční sady sklo – ocel	51
obr. 7.15: Adhezní porušení mezi vrstvou lepidla a středového pozinkovaného plechu, viditelné ulomení skla – vzorek č. 3 z referenční sady sklo – ocel	51
obr. 7.16: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků sklo – ocel za teploty 60°C.....	52
obr. 7.17: Adhezně kohezní porušení uvnitř vrstvy lepidla – vzorek č. 2 ze sady sklo – ocel za teploty 60°C.....	53
obr. 7.18: Adhezně kohezní porušení, viditelné potrhání vrstvy lepidla – vzorek č. 4 (vlevo) a vzorek č. 3 (vpravo) ze sady sklo – ocel za teploty 60°C	53
obr. 7.19: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, viditelný je zde pravidelný klenbovitý tvar typický pro všechny takto porušené vzorky	57
obr. 7.20: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, viditelný je zde pravidelný klenbovitý tvar typický pro všechny takto porušené vzorky	58
obr. 7.21: Porušení zkušebních vzorků se skleněným substrátem při vytvrzování, porušení je totožné pro vzorky ochlazované rychleji (vlevo) a pozvolna (vpravo)	58
obr. 7.22: Náhradní řešení, nalepený vzorek s ocelovým středovým plechem a ocelovým bočním dílcem	59
obr. 7.23: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro referenční sadu vzorků ocel - ocel	60

obr. 7.24: Téměř čisté adhezní porušení spoje, vlevo viditelné stopy zinku ve vrstvě lepidla – vzorek č. 1 z referenční sady ocel - ocel	60
obr. 7.25: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků ocel – ocel za teploty 200°C – poměrná smyková deformace je pouze orientační	62
obr. 7.26: Adhezní porušení od obou substrátů (zinek / ocel) – vzorek č. 2 (vlevo) a vzorek č. 3 (vpravo) ze sady za teploty 200°C, viditelné bublinky ve vrstvě lepidla.....	62
obr. 7.27: Graf smykového napětí v závislosti na smykové deformaci pro sadu vzorků ocel – ocel za teploty 230°C – poměrná smyková deformace je pouze orientační	64
obr. 7.28: Adhezní porušení od obou substrátů (zinek / ocel) – vzorek č. 1 (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo) ze sady za teploty 230°C, viditelné bublinky ve vrstvě lepidla.....	64
obr. 7.29: Adhezní porušení od zinkového povrchu – přední část vzorku č. 4	65
obr. 7.30: Adhezní porušení od ocelového povrchu – zadní část vzorku č. 4	65
obr. 8.1: Geometrie modelu (vlevo) a zhuštění sítě prvků pro vrstvu lepidla (vpravo).....	69
obr. 8.2: Zatížení modelu silou (červeně) a pevné podpory na bočních dílech (modře)	70
obr. 8.3: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 3 za teploty 20°C a matematického modelu ze software Ansys.....	71
obr. 8.4: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 20°C	71
obr. 8.5: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 4 za teploty 200°C a matematického modelu ze software Ansys.....	72
obr. 8.6: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 200°C	72
obr. 8.7: Graf smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci – porovnání vzorku č. 2 za teploty 230°C a matematického modelu ze software Ansys.....	73
obr. 8.8: Grafický výstup ze software Ansys – max. smykové napětí (vlevo) a deformace (vpravo) vrstvy lepidla pro vzorek za teploty 230°C	73
obr. 8.9: Příklady provozu / konstrukcí, kde by bylo možné uplatnění lepeného spoje	75
obr. 8.10: Geometrie modelového spoje kotevní desky s nosníkem	76
obr. 8.11: Zatížení silou směrem dolů (červeně) a kloubové podpory na krajích nosníku (A, B).....	76
obr. 8.12: Průběh teploty v celém modelu, teplota 250°C simuluje závěs technologického potrubí, které ohřívá celou konstrukci	77
obr. 8.13: Průběh teploty ve vrstvě lepidla, od stanoveného zatížení dosahuje maximální teplota ve vrstvě lepidla necelých 90°C.....	77
obr. 8.14: Průběh smykového napětí ve vrstvě lepidla, maximum = 0,37 MPa.....	78
obr. 8.15: Průběh poměrného smykového přetvoření ve vrstvě lepidla, při max. smykovém napětí dosahuje hodnot 0,052 (záporné hodnoty označují pouze opačný směr na ose Y)	78
obr. 8.16: Max. smykové napětí ve vrstvě lepidla, zatížení silou a teplotou 230 °C.....	79
obr. 8.17: Max. poměrné přetvoření ve vrstvě lepidla při zatížení silou a teplotou 230 °C.....	79

13. Seznam tabulek

tab. 3.1: Rozdílné vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru makromolekul [18]	22
tab. 4.1: Obecné technické parametry jednosložkových a dvousložkových silikonů.....	28
tab. 7.1: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s hliníkovým středním plechem (sklo-hliník) za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou chybné hodnoty měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty	44
tab. 7.2: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s pozinkovaným středním plechem (sklo-ocel) za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou chybné hodnoty měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty	45
tab. 7.3: Průměrné výsledky měření z první části zkoušek.....	54
tab. 7.5: Naměřené a průměrné hodnoty ze všech zkoušek pro sady vzorků s pozinkovaným středním plechem (ocel-ocel), za běžné i zvýšené teploty – červeně vyznačené jsou neprůkazné hodnoty z měření, které nebyly do celkových výsledků zahrnuty	56
tab. 7.6: Průměrné výsledky měření z druhé části zkoušek.....	66
tab. 8.1: Materiálové vlastnosti použité pro výpočetní model.....	69
tab. 8.2: Vybrané vlastnosti materiálů v modelu [25]	76



Product Overview

Crestabond M7-05 is a toughened, two component 1:1 acrylic adhesive designed for bonding composites, thermoplastics and metals. This new generation of structural methacrylate adhesive meets the bonding requirements of most assembly operations. Demonstrating excellent impact, peel, shear, compressive strength and fatigue resistance properties across all bonded parts.

Features and Benefits

Primerless application including zinc/galvanised	▶	No need for extra materials or processes
Excellent adhesion to dissimilar substrates	▶	Affords greater flexibility in design
Fast setting and curing	▶	Speeds up assembly process
Non-sag	▶	Application on vertical surfaces
High strength, modulus and toughness	▶	Designed for demanding structural applications
Excellent environmental resistance	▶	Designed for demanding environmental applications

Application Properties

Working Time ¹	4 – 7 Minutes
Fixture Time ²	18 – 22 Minutes
Gap Filling	1 – 5 mm (0.04-0.2 inch)
Mixed Colour	Off White or Black
Recommended Application Temperature	18 - 25 °C (64 - 77°F)

Mechanical Properties

Tensile Strength ³	22 - 25 MPa (3.2 - 3.6 ksi)
Tensile Modulus ³	1200 - 1700 MPa (174 - 246 ksi)
Tensile Elongation ³	25 - 30%
Aluminium Lap shear ⁴	17 - 22 MPa (2.4 - 3.2 ksi)
Recommended Operating Temperature ⁵	-40 - 100 °C (-40 - 212°F)

Liquid Properties

Product	M7-05 Adhesive	M7-05 Activator
Viscosity ⁶	50,000 - 70,000 cP 200-500 & 400-1000 dPa.s**	30,000 - 50,000 cP 120-250 & 1400-3000 dPa.s**
Specific Gravity	1.00 - 1.03 g/cc	0.98 - 1.00 g/cc
Mix Ratio (by volume)	1	1
Mix Ratio (by weight)	1	1
Colour	Off white or Black	Off white
Shelf Life ⁷	9 months	9 months

Substrates

	Recommended Substrates (Lap Shear Strength MPa ⁴)	Non - Recommended Substrates
Plastics	Acrylic ¹⁰ 22 - 26 MPa PVC ⁸ 16 - 22 MPa ABS ⁸ 13 - 15 MPa Other: Urethanes, Nylon and common engineering thermoplastics	Low Surface Energy Plastics e.g. PP, PE & PTFE (use Crestabond PP-04)
Metals	Stainless ¹⁰ 21 - 25 MPa CRS ¹⁰ 21 - 25 MPa Aluminium ⁹ 17 - 22 MPa Zinc/Galvanised ⁹ 13 - 18 MPa Other: Powder Coated Metals, Carbon Steel	Copper
Composites	GRP/FRP ⁸ 8 - 12 MPa Carbon Fibre/ Polyester DCPD Modified Vinyl Esters Epoxy ¹¹ Gelcoats ¹²	-

Please contact Scott Bader technical services for information and advice on other substrates

Surface Preparation

The surface to be bonded can affect the strength and durability of the bond joint. Appropriate treatment may be required to ensure that there are no traces of oil, grease, dirt or release agents through the use of a degreasing agent, for instance acetone or another degreasing agent on the joint surfaces.

Mechanically abrading or chemically etching degreased surfaces can make bond joints more durable and stronger. If abrading, a second treatment of degreasing is highly recommended.

Do not use petrol (gasoline), low grade alcohol or paint thinners.

i) Metals

Typically, the surface should be clean and dry by using an alcohol/solvent wipe and allowing the solvent to evaporate before application. Certain metals, such as carbon steel may also require mechanical abrasion and a subsequent alcohol solvent wipe prior to bonding.

ii) Thermoplastics

The surface must be clean, dust-free and dry. A suitable solvent such as iso-propanol can be used to degrease.

iii) Composites

The surface must be clean, dust-free and dry. This can be achieved by the use of proprietary strippable cloths such as peel-ply (without lubricant contaminants). The laminate should be fully cured prior to bonding and if the laminate surfaces are more than 3 days old, it is recommended that the surface must be cleaned with a suitable solvent or cleaner with a lint-free, clean cloth prior to bonding.

Surface preparation, such as mechanical abrasion, is likely to be needed on gel coat surfaces and moulded surfaces where release agents are likely to be present. When bonding epoxy laminates please test bond strength prior to application.

Application

Prior to bonding, ensure the substrate surface is clean by following the surface preparation instructions provided. Bulk dispensing equipment should be in good operating condition. Dispense the adhesive at a slow rate initially onto a non-bonding surface until the mixed bead colour is uniform. Check the dispensed bead for cure quality before beginning the bonding process.

Dispense enough adhesive to fill the bond gap before parts are mated. Avoid dry bonds by using adequate pressure to mate parts and clamp properly to prevent joint movement. The working time is the approximate time after mixing that the adhesive is still usable. The bonding process must be completed before the working time of the mixed adhesive expires. The viscosities of both adhesive and activator are affected by temperature. The adhesive, activator and parts to be bonded should be allowed to attain workshop temperature of between 18°C and 25°C (64°F and 77°F) prior to bonding. The operating temperature should be maintained during the bonding process and until the adhesive is sufficiently cured to allow movement of the assembly. Typically, such movement may be possible after the fixture time of the adhesive is achieved. Ambient temperature, bondline thickness and the substrate materials being bonded can all affect the fixture time.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. The user must determine the suitability of a selected adhesive for a given substrate and application. Contact your local Scott Bader representative for questions or assistance with the selection of adhesives for your use. This product is intended for use by skilled individuals at their own risk. Recommendations contained herein are based on information we believe to be reliable.

Storage and Shelf Life

Crestabond products should be stored in their original container out of direct sunlight. The bulk product or cartridge material should be opened only immediately prior to use. The expiry date is indicated on the product labels.

The shelf life is defined from date of manufacture when stored at a recommended temperature between 2°C and 23°C (36°F and 73°F). It is highly recommended that products should never be frozen. Exposure to temperatures above 23°C (36°F) will reduce the shelf life of these materials. Exposure above 35°C (95°F) of activators, including the cartridges, should be avoided as the reactivity of the product is quickly diminished.

Packaging

Crestabond M7-05 is supplied in 18Kg (40 lb) plastic pails, 180Kg (397 lb) drums, pre-packed 50ml and 400ml side by side cartridges.

Health and Safety

See separate Material Safety Data Sheet.

1. Working time measured with 10g mass of adhesive with 1:1 mix ratio by volume at 24°C (75°F).	2. Fixture time defined using an ISO 4587 lap shear sample, 0.26mm bondline thickness with 23°C (73°F) ambient temperature achieving >1.4MPa.
3. Tested to ASTM D638.	4. Metals tested according to ISO 4587, Thermoplastics according to ASTM 2564 and GRP according ASTM 5868.
5. Maximum temperature where an ISO 4587 lap shear sample, 0.26mm bondline thickness achieves >3MPa.	6. Viscosity measured using a Brookfield Viscometer at 24°C (75°F)* Viscosity measured using HAKKE RV1 Rheometer at 25°C (77°F)**
7. Shelf life defined from date of manufacture when stored as recommended.	8. Substrate failure when tested.
9. Adhesive failure when tested.	10. Cohesive failure when tested.
11. Surface preparation of epoxy laminates may be necessary and testing should be performed to ensure sufficient bond strength is achieved.	12. Surface preparation is likely to be needed on gelcoat surfaces to ensure no release agents are present.



© 2020 ScottBader Co Ltd, February 2020

Scott Bader UK

Wollaston, Wellingborough, Northants
NN29 7RL, UK

Tel: +44 (0)1933 666738

Email: enquiries@scottbader.com

All information on this data sheet is based on laboratory testing and is not intended for design purposes. Scott Bader makes no representations or warranties of any kind concerning this data. Due to variance of storage, handling and application of these materials, Scott Bader cannot accept liability for results obtained. The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

Features & Benefits

- 💧 Excellent adhesive strength
- 💧 Excellent resistance to vibration
- 💧 Easy to use – no mixing required
- 💧 High shear and peel strength
- 💧 Good impact strength
- 💧 Ultra - high temperature resistance
- 💧 Good resistance to chemicals

Description

PERMABOND[®] ES5504 is a single-part, heat cured, metal filled paste adhesive with controlled flow characteristics at ambient and elevated temperatures. It has good impact and vibration resistance and can resist temperatures of over 250°C (480°F). ES5504 will bond a wide variety of materials and performance is usually limited by the strength of the adherends themselves. In many applications it can be used to replace traditional fixing techniques (such as welding, brazing or mechanical fasteners) to give enhanced appearance and greater design flexibility.

Physical Properties of Uncured Adhesive

Chemical composition	Epoxy Resin
Appearance	Grey
Viscosity @ 25°C	Paste
Specific gravity	1.6

Typical Curing Properties

Flow at high temperature	Controlled flow
Maximum gap fill	2 mm 0.08 in
Cure speed (oven) *	150°C (300°F): for 1 hour plus 200°C (390°F): for 1 hour
Cure speed (induction)	<3 minutes

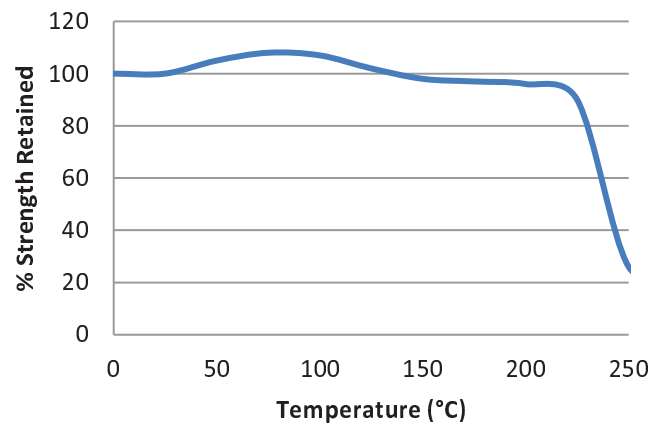
**Actual cure times will depend on the time it takes for the adhesive to reach this temperature - for example, large assemblies or a crowded oven will require longer to reach full cure. Alternative, quicker methods of curing include induction, hotplates, infrared lamps and hot-air guns.*

Typical Performance of Cured Adhesive

Shear strength* (ISO4587)	Aluminium 18 - 22 N/mm ² (2600 – 3200 psi)
Peel strength (aluminium)	100-140 N/25mm
Impact strength (ASTM D950)	20-30 KJ/m ²
Hardness (ISO868)	85-90 Shore D
Coefficient of thermal expansion	45 x 10 ⁻⁶ (1/K)
Thermal conductivity	1.12 W/(m.K)

**Strength results will vary depending on the level of surface preparation and gap.*

Hot Strength

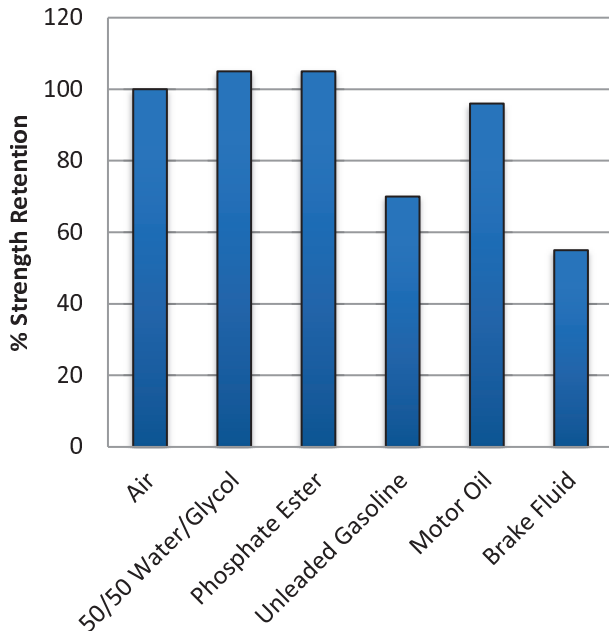


“Hot strength” shear strength tests performed on mild steel. Fully cured then conditioned to pull temperature for 30 minutes before testing. ES5504 can withstand higher temperatures for brief periods (such as for paint baking and wave soldering processes) providing the joint is not unduly stressed. The minimum temperature the cured adhesive can be exposed to is -40°C (-40°F) depending on the materials being bonded.

The information given and the recommendations made herein are based on our research and are believed to be accurate but no guarantee of their accuracy is made. In every case we urge and recommend that purchasers before using any product in full-scale production make their own tests to determine to their own satisfaction whether the product is of acceptable quality and is suitable for their particular purpose under their own operating conditions. THE PRODUCTS DISCLOSED HEREIN ARE SOLD WITHOUT ANY WARRANTY AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED.

No representative of ours has any authority to waive or change the foregoing provisions but, subject to such provisions, our engineers are available to assist purchasers in adapting our products to their needs and to the circumstances prevailing in their business. Nothing contained herein shall be construed to imply the non-existence of any relevant patents or to constitute a permission, inducement or recommendation to practice any invention covered by any patent, without authority from the owner of this patent. We also expect purchasers to use our products in accordance with the guiding principles of the Chemical Manufacturers Association’s Responsible Care[®] program.

Chemical Resistance



Specimens were immersed for 30 days at 85°C and tested at room temperature.

Additional Information

This product is not recommended for use in contact with strong oxidizing materials. Information regarding the safe handling of this material may be obtained from the safety data sheet (SDS). Users are reminded that all materials, whether innocuous or not, should be handled in accordance with the principles of good industrial hygiene.

This Technical Datasheet (TDS) offers guideline information and does not constitute a specification.

Storage & Handling

Storage Temperature	2 to 7°C (35 to 45°F)
---------------------	-----------------------

Surface Preparation

Surfaces should be clean, dry and grease-free before applying the adhesive. Use a suitable solvent (such as acetone or isopropanol) for the degreasing of surfaces. Some metals such as aluminium, copper and its alloys will benefit from light abrasion with emery cloth (or similar), to remove the oxide layer.

Directions for Use

- 1) The adhesive should be dispensed from the bottle via the nozzle supplied (this can be cut to give the appropriate sized bead to cover the bond area).
- 2) Apply the adhesive to one surface and avoid entrapping air.
- 3) Assemble parts applying sufficient pressure to ensure the adhesive spreads to cover the entire bond area.
- 4) Use a jig / clamp to prevent parts moving during cure.
- 5) It is advisable not to disturb the joint until the adhesive is fully cured.
- 6) Cure with heat – see page one for cure schedule.

Video Links

Surface preparation:

<https://youtu.be/8CMOMP7hXiU>



Single-part epoxy directions for use:

<https://youtu.be/KupaieuuZw>



www.permabond.com

- UK: 0800 975 9800
- General Enquiries: +44 (0)1962 711661
- US: 732-868-1372
- Asia: + 86 21 5773 4913
- info.europe@permabond.com
- info.americas@permabond.com
- info.asia@permabond.com

The information given and the recommendations made herein are based on our research and are believed to be accurate but no guarantee of their accuracy is made. In every case we urge and recommend that purchasers before using any product in full-scale production make their own tests to determine to their own satisfaction whether the product is of acceptable quality and is suitable for their particular purpose under their own operating conditions. THE PRODUCTS DISCLOSED HEREIN ARE SOLD WITHOUT ANY WARRANTY AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED.

No representative of ours has any authority to waive or change the foregoing provisions but, subject to such provisions, our engineers are available to assist purchasers in adapting our products to their needs and to the circumstances prevailing in their business. Nothing contained herein shall be construed to imply the non-existence of any relevant patents or to constitute a permission, inducement or recommendation to practice any invention covered by any patent, without authority from the owner of this patent. We also expect purchasers to use our products in accordance with the guiding principles of the Chemical Manufacturers Association's Responsible Care® program.